



**ÉTUDE D'UN SYSTÈME INTERACTIF SÉCURITAIRE DÉDIÉ À
L'INTERACTION HUMAIN-ROBOT APPLIQUÉ À DES
MÉCANISMES PARALLÈLES ENTRAÎNÉS PAR DES CÂBLES**

**PAR
RAMY MEZIANE**

**Thèse présentée à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade
de Philosophiae Doctor en ingénierie**

Québec, Canada

© Ramy MEZIANE, 2018

RÉSUMÉ

Depuis l'introduction des premiers robots interactifs en industrie, qui étaient à la base des systèmes collaboratifs supposés assister les humains dans les tâches pénibles et éprouvantes physiquement, le domaine de l'interaction humain-robot a fait des progrès considérables. Actuellement, les robots et les humains peuvent coexister conjointement dans un espace hybride afin de partager des tâches de production ou de partager le temps dans l'exécution d'une activité. Cependant, les nouveaux besoins industriels doivent conduire à des recherches pour adapter les chaînes de production et les rendre plus flexible et réactive à la modification des caractéristiques des produits.

L'une des solutions consiste à adapter le manipulateur industriel présent dans les lignes de production à des fins d'interaction et de collaboration. Toutefois, la présence de l'humain dans l'espace de travail d'un manipulateur (cellule de travail hybride) représente un réel défi dans le domaine de l'interaction humain-robot puisque cela consiste à l'intégration d'une multitude de variétés de capteurs dits intelligents, surtout dans le cas de l'utilisation d'un mécanisme parallèle entraîné par des câbles. Pour cette raison, plusieurs problématiques ont été soulevées, pour lesquelles peu ou pas de recherches sont réalisées : cette nouvelle technologie est introduite sans entraînement de l'opérateur, l'évaluation de la sécurité a été très peu explorée lors de l'interaction et la performance de son utilisation demeure peu évaluée dans un contexte de réduction des troubles musculosquelettiques (TMS).

Le projet de recherche vise l'étude et la conception d'un système interactif permettant d'améliorer la sécurité et l'intuitivité des personnes qui interagissent avec des mécanismes parallèles entraînés par des câbles. Deux modes d'interaction sont étudiés dans le système interactif, à savoir le partage des activités et l'interaction physique.

En premier lieu, une méthode de génération de trajectoires avec évitement de collisions appliquée pour le mode de partage des activités est proposée. L'effecteur du manipulateur suit un chemin dans l'espace opérationnel à travers des points de passage. Ces derniers sont générés par un réseau de neurones rétropropagation (Back-propagation), et sont reliés par un polynôme quintique (de degré cinq). En outre, la géométrie déformable de l'obstacle et l'environnement dynamique sont pris en compte dans la méthode.

En second lieu, une approche est abordée pour déterminer la distance minimale entre les câbles et identifier ceux qui sont en interférence. Le calcul de distance est exécuté en temps réel à travers un algorithme. En outre, les contraintes physiques des câbles ont été prises en compte dans la modélisation mathématique et formulées en un problème d'optimisation non linéaire. Ce dernier est résolu en utilisant l'approche de Karush-Kuhn-Tucker (KKT).

Cette méthode de calcul de distance est intégrée à une loi de commande interactive permettant de gérer les câbles en interférence pendant l'interaction physique avec le mécanisme. Une force est calculée et introduite dans la boucle de la commande afin d'éviter le croisement et le relâchement des câbles en interférence. Par ce fait, la tâche est exécutée jusqu'aux limites des possibilités géométriques et cinématiques du mécanisme. Par ailleurs, cette stratégie est basée sur une commande en admittance pour permettre l'interaction physiquement avec un mécanisme parallèle entraîné par des câbles.

Un algorithme permettant de sélectionner entre ces deux modes est proposé. Cette approche inclut un vêtement intelligent pour le changement de mode de manière intuitive simple et rapide. L'algorithme est exécuté en temps réel et basé sur une identification de gestes utilisant un polynôme d'interpolation trigonométrique. Les signaux analysés proviennent d'une semelle instrumentée qui est située au niveau du pied.

Enfin, les différents algorithmes et stratégies sont validés en simulations et à travers des expérimentations sur un mécanisme parallèle entraîné par sept câbles. Ce projet de thèse apporte plusieurs contributions dans le domaine de l'interaction humain-robot notamment la capacité d'adaptation du système interactif pour des tâches industrielles.

ABSTRACT

Since the introduction of the first interactive robots in industry, which was the collaborative robots (labelled as COBOT), the field of human robot interaction has made considerable progress. In its early version, those robots were used to increase muscle strength of the operator for moving heavy loads. Recently, robots and humans can share the same workspace, production activities or working time. However, new needs in industry require more flexibility and reactivity supporting fast changes in product characteristics

One solution consists in the adaptation of an industrial robot, that is already installed in the production line, for interaction and collaboration purposes such as kinetic learning assembly task, and adaptive third hand. However, the presence of the human in the manipulators' workspace (hybrid work cell) represents a real challenge in the field of human-robot interaction. It consists in the integration of an intelligent sensor varieties, especially when the cables driven parallel mechanisms (CDPM) are used for an interaction task. For these reasons, several issues have been raised, for which few or no research has been done yet. This new technology is introduced without any operators training and the safety assessment has been very little explored during the interaction. Moreover, the performance of its use remains poorly evaluated in a context of reduction of musculoskeletal disorders (MSDs).

The research project aims to study and design an interactive system in order to improve the safety and the intuitivity when the humans interact with cables driven parallel mechanisms. Two modes of cooperation are studied in the interactive system, namely the sharing of activities and the physical interaction.

First, a trajectory generating method for an industrial manipulator in a shared workspace is proposed. A neural network using a supervised learning is applied to create the waypoints required for dynamic obstacles avoidance. These points are linked with a quintic polynomial function for smooth motion which is optimized using least-square to compute an optimal trajectory. Moreover, the evaluation of human motion forms has been taken into consideration in the proposed strategy.

Second, a mathematical approach is presented to determine the minimum distance between cables and to identify which ones are interfering. To execute this approach in real time, an algorithm is also presented for calculating this distance. Furthermore, the physical constraints of the cables have been considered in mathematical modeling and formulated into a nonlinear optimization problem. The latter is solved using the Karush-Kuhn-Tucker (KKT) approach.

This method of distance calculation is integrated with a new interactive control that eliminates the computation of the effect of a folding interfered cable. A control strategy is proposed, which allows to manage the cables in interference while the operator physically interacts with the mechanism. A repulsive force is generated and introduced to the controller to avoid the cables crossing and folding. Therefore, the task is executed within the limits of the kinematic possibilities. Moreover, this strategy is based on an admittance control for physically interacting with a CDPM.

In order to allow a change of intuitive interaction mode, an algorithm for selecting between these two modes is proposed. This approach includes an instrumented insole placed into a shoe for intuitive mode change quick and easy. The algorithm is executed in real time and based on a gesture identification using a trigonometric interpolation polynomial.

Finally, these different strategies and algorithms are validated in simulations and through experiments on a parallel mechanism driven by seven cables. This thesis project brings several contributions in the field of human-robot interaction including the ability of the interactive system to adapt for industrial tasks.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
ABSTRACT.....	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
ACRONYMES.....	xiii
NOMENCLATURES.....	xiv
REMERCIEMENTS.....	xvi
CHAPITRE 1.....	1
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.1 Généralités.....	1
1.2 Problématique.....	16
1.3 Objectifs du projet de recherche.....	18
1.4 Méthodologie de recherche.....	19
1.5 Originalité de la thèse.....	22
1.6 Contenu de la thèse.....	24
CHAPITRE 2.....	27
PARTAGE DES ACTIVITÉS DE PRODUCTION EN COLLABORATION HUMAIN-MANIPULATEUR.....	27
2.1 Introduction.....	28
2.1.1 Génération de trajectoires dans l'espace articulaire et opérationnel.....	29
2.1.2 Interpolation polynomiale.....	31
2.1.3 Algorithmes et méthode d'évitement de collisions.....	34
2.2 Génération de trajectoires pour l'évitement des collisions.....	36
2.2.1 Discrétisation et codage de l'espace de travail.....	38
2.2.2 Apprentissage du réseau de neurones.....	41
2.2.3 Calcul de la trajectoire optimale.....	43
2.2.4 Algorithme de génération de trajectoires sécuritaires.....	47
2.3 Simulations de la génération de trajectoires.....	50
2.3.1 Détermination de la structure du réseau de neurones.....	50
2.3.2 Résultats des simulations.....	51

2.4	Discussion et conclusion.....	59
CHAPITRE 3		61
MODÉLISATION MATHÉMATIQUE ET CALCUL DE DISTANCE MINIMALE ENTRE LES CÂBLES...		61
3.1	Introduction.....	62
3.2	Modèles géométrique et cinématique du mécanisme.....	65
3.3	Calcul de la distance minimale entre les câbles	69
3.3.1	Détermination géométrique de la distance minimale.....	70
3.3.2	Détermination analytique de la distance minimale	72
3.4	Expérimentations de la méthode de calcul de distance minimale	83
3.5	Discussion et conclusion.....	90
CHAPITRE 4		91
COMMANDE INTERACTIVE AVEC GESTION DES INTERFÉRENCES		91
4.1	Introduction.....	92
4.1.1	Interférences entre les câbles	92
4.1.2	Commande interactive.....	95
4.2	Commande en admittance pour l'interaction physique.....	96
4.3	Adaptation de la commande avec gestion des interférences	100
4.3.1	Détermination de la direction du vecteur force d'interférence	102
4.3.2	Détermination de la direction du torseur d'interférence	106
4.3.3	Calcul de l'intensité de la force et du torseur au point d'interférence	113
4.3.4	Algorithme de gestion des interférences.....	116
4.4	Validation de la stratégie de la gestion des interférences.....	117
4.4.1	Simulations basées sur le calcul du torseur.....	119
4.4.2	Expérimentations basées sur le calcul du vecteur de force.....	131
4.5	Discussion et conclusion.....	142
CHAPITRE 5		145
SÉLECTION ENTRE LE MODE DE PARTAGE DES ACTIVITÉS ET D'INTERACTION PHYSIQUE BASÉ SUR UNE SEMELLE INSTRUMENTÉE.....		145
5.1	Introduction.....	146
5.1.1	Distinction de mode en considérant des capteurs intrinsèques et extrinsèques.....	147
5.1.2	Distinction de mode en utilisant un instrument externe.....	148
5.2	Approche proposée pour la sélection de mode.....	151

5.2.1	Instrument proposé pour le changement de mode	152
5.2.2	Classification du geste	154
5.2.3	Modèle d'identification du geste	155
5.2.4	Algorithme de sélection de mode	160
5.3	Expérimentations de l'algorithme sur le mécanisme	162
5.3.1	Détermination du modèle d'identification et des seuils de validation	164
5.3.2	Résultats des expérimentations	169
5.4	Discussion et conclusion.....	177
CHAPITRE 6		179
RECOMMANDATIONS POUR LE SYSTÈME INTERACTIF		179
6.1	Introduction.....	180
6.2	Outils pour l'évaluation de l'opérateur	181
6.3	Algorithme global	183
6.4	Calcul de risque d'accident.....	185
6.5	Expérimentation sur la plateforme hybride.....	187
6.5.1	Plateforme hybride pour l'assemblage en coopération (FMS).....	187
6.5.2	Déroulement des expériences avec collaboration de l'opérateur	189
6.5.3	Résultats de l'expérience	191
6.6	Conclusion	194
CHAPITRE 7		196
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS		196
7.1	Conclusion générale.....	197
7.2	Recommandations pour chaque chapitre	200
7.3	Recommandation générale.....	202
LISTE DES RÉFÉRENCES		204
ANNEXE		216
ANNEXE 1 : CERTIFICAT D'ÉTHIQUE		216

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2-1 : CLASSIFICATIONS DES TYPES DE TRAJECTOIRES	29
TABLEAU 2-2 : RÉSULTATS DU CALCUL DES COEFFICIENTS POUR LA GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRES SUR L'AXE X	44
TABLEAU 2-3 : ÉVALUATION DES STRUCTURES DU RÉSEAU DE NEURONES	51
TABLEAU 3-1 : POSITION CARTÉSIENNE RÉELLE DES ENROULEURS ET DES POINTS D'ATTACHE ..	84
TABLEAU 3-2 : CALCUL DE LA DISTANCE MINIMALE POUR LA PREMIÈRE EXPÉRIENCE.....	86
TABLEAU 3-3 : CALCUL DE LA DISTANCE MINIMALE POUR LA DEUXIÈME EXPÉRIENCE.....	88
TABLEAU 5-1 : COMPARAISON ENTRE LES NOMBRES DE COEFFICIENTS	165
TABLEAU 5-2 : DÉFINITION DU SEUIL MAXIMUM DE DÉTECTION	167
TABLEAU 5-3 : RÉSULTATS DE LA CORRÉLATION CROISÉE DES QUATRE EXPÉRIENCES	175
TABLEAU 6-1 : DÉTERMINATION DU NIVEAU DE SÉVÉRITÉ.....	186

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1-1 : ROBOT HYDRAULIQUE MAITRE-ESCLAVE DU CEA-LIST (P. DUMAS, 2007).....	3
FIGURE 1-2 : CLAVIER TACTILE [8]	4
FIGURE 1-3 : EXEMPLES D'EXOSQUELETTES [12].....	5
FIGURE 1-4 : PARTAGE DES ACTIVITÉS DANS UN ESPACE DE TRAVAIL HYBRIDE [13]	6
FIGURE 1-5 : EXEMPLE DE PARTAGE DU TEMPS DES ACTIVITÉS [14].....	7
FIGURE 1-6 : ROBOT ASSISTANT À LA RÉPARATION DE PNEUS (RB3D) [15]	8
FIGURE 1-7 : MANIPULATEUR ASSISTANT POUR UNE TÂCHE D'ASSEMBLAGE [13].....	9
FIGURE 1-8 : ROBOT DLR (LIGHT WEIGHT ROBOT III) [17]	9
FIGURE 1-9 : SIMULATEUR DE VOL, LUFTHANSA	11
FIGURE 1-10 : FLEXPICKER, ABB [23].....	11
FIGURE 1-11 : SYSTÈME SKAYCAM BASÉ SUR UN MPEC [27].....	14
FIGURE 1-12 : MÉCANISME PLEINEMENT CONTRAINT, IPANEMA [30].....	14
FIGURE 1-13 : PROJET COGIRO, LIRMM [32]	15
FIGURE 1-14 : SYSTÈME INTERACTIF SÉCURITAIRE PROPOSÉ	22
FIGURE 1-15 : STRUCTURE DE LA THÈSE.....	25
FIGURE 2-1 : GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRES DANS L'ESPACE ARTICULAIRE.....	30
FIGURE 2-2 : GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRES DANS L'ESPACE CARTÉSIEN	31
FIGURE 2-3 : STRATÉGIE PROPOSÉE POUR L'ÉVITEMENT DE COLLISIONS.....	37
FIGURE 2-4 : EXEMPLE D'ESPACE DE TRAVAIL DISCRÉTISÉ EN MATRICE 3D	39
FIGURE 2-5 : EXEMPLE DE CONFIGURATION DISCRÉTISÉE EN 3D.....	40
FIGURE 2-6 : ÉVALUATION DE LA GÉOMÈTRE DÉFORMABLE.....	41
FIGURE 2-7 : STRUCTURE DU RÉSEAU DE NEURONES	42
FIGURE 2-8 : CALCUL DE DISTANCE ENTRE LE SEGMENT HUMAIN ET CELUI DU MANIPULATEUR	48

FIGURE 2-9 : ALGORITHME DE GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRES DANS L'ENVIRONNEMENT DYNAMIQUE.....	48
FIGURE 2-10 : TRAJECTOIRE 3D AVEC UN POINT INTERMÉDIAIRE	53
FIGURE 2-11 : TRAJECTOIRE 3D AVEC DEUX POINTS INTERMÉDIAIRES.....	54
FIGURE 2-12 : GRAPHES DES VITESSES ET ACCÉLÉRATION DE LA PREMIÈRE SIMULATION	55
FIGURE 2-13 : GRAPHES DES VITESSES ET ACCÉLÉRATION DE LA DEUXIÈME SIMULATION	56
FIGURE 2-14 : TRAJECTOIRE 3D SANS FRANCHISSEMENT DU POINT INTERMÉDIAIRE.....	56
FIGURE 2-15 : SIMULATION DYNAMIQUE AVEC CORRECTION DE LA TRAJECTOIRE.....	58
FIGURE 3-1 : IMAGE RÉELLE DU MÉCANISME ENTRAÎNÉ PAR SEPT CÂBLES.....	63
FIGURE 3-2 : DESSIN 3D DU MÉCANISME À 7 CÂBLES (JEAN-FRANÇOIS PARENT, ULAVAL 2017)....	64
FIGURE 3-3 : ILLUSTRATION DU MÉCANISME AVEC LES DIFFÉRENTES COMPOSANTES ET REPÈRES	67
FIGURE 3-4 : ANALYSE GÉOMÉTRIQUE DU MPEC POUR UN CÂBLE.....	67
FIGURE 3-5 : VISUALISATION DU PLAN D'INTERFÉRENCE ENTRE DEUX CÂBLES.....	71
FIGURE 3-6 : FORMULATION VECTORIELLE DE LA DISTANCE ENTRE DEUX CÂBLES.....	71
FIGURE 3-7 : ALGORITHME POUR LE CALCUL DE DISTANCE ENTRE CHAQUE PAIRE DE CÂBLES ..	82
FIGURE 3-8 : ILLUSTRATION SUR LE MPEC DU CALCUL DE DISTANCE MINIMALE POUR LA PREMIÈRE EXPÉRIENCE	87
FIGURE 3-9 : ILLUSTRATION SUR LE MPEC DU CALCUL DE DISTANCE MINIMALE POUR LA DEUXIÈME EXPÉRIENCE	89
FIGURE 4-1 : SCHÉMA GÉNÉRAL DE LA COMMANDE EN ADMITTANCE	97
FIGURE 4-2 : SCHÉMA DE COMMANDE AVEC GESTION DES INTERFÉRENCES.....	101
FIGURE 4-3 : ALGORITHME TEMPS RÉEL POUR LA GESTION DES INTERFÉRENCES	116
FIGURE 4-4 : ILLUSTRATION DU MÉCANISME AVEC DEUX CÂBLES INVERSÉS.....	118
FIGURE 4-5 : EXEMPLE DE FONCTION LOGISTIQUE AVEC UNE FORCE MAXIMALE	118
FIGURE 4-6 : ÉVOLUTION DE LA DISTANCE ENTRE LES CÂBLES (1,3) PENDANT LA PREMIÈRE SIMULATION.....	122
FIGURE 4-7 : FORCES ET MOMENTS APPLIQUÉS PENDANT LA PREMIÈRE SIMULATION.....	123

FIGURE 4-8 : TRAJECTOIRE CARTÉSIENNE PARCOURUE DURANT LA PREMIÈRE SIMULATION	123
FIGURE 4-9 : FORCES ET MOMENTS APPLIQUÉS PENDANT LA DEUXIÈME SIMULATION.....	125
FIGURE 4-10 : REPRÉSENTATION DU MÉCANISME LORS DE LA DEUXIÈME SIMULATION.....	126
FIGURE 4-11 : TRAJECTOIRE CARTÉSIENNE PARCOURUE DURANT LA DEUXIÈME SIMULATION .	127
FIGURE 4-12 : FORCES ET MOMENTS APPLIQUÉS PENDANT LA TROISIÈME SIMULATION	128
FIGURE 4-13 : REPRÉSENTATION DU MÉCANISME LORS DE LA TROISIÈME SIMULATION	129
FIGURE 4-14 : TRAJECTOIRE CARTÉSIENNE PARCOURUE DURANT LA TROISIÈME SIMULATION .	130
FIGURE 4-15 : ILLUSTRATION DE LA PREMIÈRE EXPÉRIENCE AU POINT DE DÉPART	132
FIGURE 4-16 : ÉVOLUTION DE LA DISTANCE ENTRE LES CÂBLES (1,3) PENDANT LA PREMIÈRE EXPÉRIENCE	133
FIGURE 4-17 : FORCES APPLIQUÉES SUR LE MÉCANISME PENDANT LA PREMIÈRE EXPÉRIENCE .	134
FIGURE 4-18 : ILLUSTRATION DE LA DEUXIÈME EXPÉRIENCE AVEC UNE INTERFÉRENCE	135
FIGURE 4-19 : FORCES APPLIQUÉES SUR LE MÉCANISME PENDANT LA DEUXIÈME EXPÉRIMENTATION.....	137
FIGURE 4-20 : REPRÉSENTATION DE LA FORCE D'INTERFÉRENCE POUR LA DEUXIÈME EXPÉRIENCE	138
FIGURE 4-21 : ILLUSTRATION DE LA TROISIÈME EXPÉRIENCE AVEC DEUX INTERFÉRENCES.....	140
FIGURE 4-22 : FORCES APPLIQUÉES AU MPEC LORS DE LA TROISIÈME EXPÉRIENCE	141
FIGURE 5-1 : PROTOTYPE DE LA SEMELLE INSTRUMENTÉE POUR LE PIED DROIT	153
FIGURE 5-2 : SCHÉMA ÉLECTRIQUE ET REPRÉSENTATION DES COMPOSANTS	153
FIGURE 5-3 : GESTE POUR LE CHANGEMENT DE MODE UTILISANT LA SEMELLE INSTRUMENTÉE [152].....	155
FIGURE 5-4 : SIGNAUX DE L'ACCÉLÉROMÈTRE À TROIS DEGRÉS DE LIBERTÉ	157
FIGURE 5-5 : NORME DE L'ACCÉLÉROMÈTRE PENDANT LE GESTE DE ROTATION.....	157
FIGURE 5-6 : ALGORITHME TEMPS RÉEL POUR SÉLECTIONNER LE MODE D'INTERACTION	161
FIGURE 5-7 : MONTAGE EXPÉRIMENTAL POUR VALIDER L'ALGORITHME DE SÉLECTION DE MODE	163
FIGURE 5-8 : COMPARAISON DES COURBES D'APPROXIMATION	165

FIGURE 5-9 : COMPARAISON ENTRE LES DONNÉES D'APPROXIMATION ET LES MESURES POUR LA VALEUR DE $K=9$	167
FIGURE 5-10 : PORTION DES SIGNAUX DES TROIS CAPTEURS FSR.....	168
FIGURE 5-11 : CAPTEURS FSR DE LA PREMIÈRE EXPÉRIENCE.....	170
FIGURE 5-12 : ILLUSTRATION DE LA PREMIÈRE EXPÉRIENCE POUR LA VALIDATION DE L'ALGORITHME DE SÉLECTION DE MODE.....	171
FIGURE 5-13 : APPLICATION DE LA CORRÉLATION CROISÉE ENTRE LES DONNÉES MESURÉES ET LE MODÈLE POUR LA PREMIÈRE EXPÉRIENCE	173
FIGURE 5-14 : RÉSULTAT DE LA CORRÉLATION CROISÉE DE LA PREMIÈRE EXPÉRIENCE	173
FIGURE 5-15 : SÉLECTION DU MODE PENDANT L'EXPÉRIMENTATION	174
FIGURE 5-16 : TRAJECTOIRE PARCOURUE PAR LE MPEC À $T = 28.18$ S	174
FIGURE 5-17 : EXPÉRIMENTATION POUR DIFFÉRENCIER ENTRE LES GESTES.....	176
FIGURE 5-18 : CORRÉLATION CROISÉE ENTRE LES GESTES.....	176
FIGURE 6-1 : DESSIN EN COUPE DU CASQUE DE SÉCURITÉ INSTRUMENTÉ.....	182
FIGURE 6-2 : PROPOSITION D'UN ALGORITHME AVEC ÉVALUATION DE L'OPÉRATEUR ET SÉLECTION DE MODE.....	183
FIGURE 6-3 : LES CATÉGORIES RETENUES POUR ÉVALUER L'ÉTAT MENTAL	186
FIGURE 6-4 : PLAN 3D DE LA PLATEFORME HYBRIDE	188
FIGURE 6-5 : SIGNAL D'ACCÉLÉRATION DE CHAQUE ACTIVITÉ.....	192
FIGURE 6-6 : NORMALISATION DE L'ACCÉLÉRATION EN UTILISANT ANOVA	193

ACRONYMES

Nom	Signification en anglais	Signification en français
PGI	-----	<i>Problème géométrique inverse</i>
PGD	-----	<i>Problème géométrique directe</i>
COBOT	<i>Collaborative robot</i>	<i>Robot collaboratif</i>
CDPM	<i>Cable Driven Parallel Mechanism</i>	-----
MPEC	-----	<i>Mécanisme parallèle entraîné par des câbles</i>
pHRI	<i>Physical Human Robot Interaction</i>	<i>Interaction physique humain-robot</i>
HRI	<i>Human Robot Interaction</i>	<i>Interaction humain-robot</i>
HCI	<i>Human-Computer Interaction</i>	<i>Interaction homme machine</i>
TMS	-----	<i>Troubles musculosquelettiques</i>
EEG	-----	<i>Électro-encéphalographie</i>
LWR III	<i>Light weight robot 3</i>	<i>Robot léger</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>	<i>Centrale inertielle</i>
KKT	<i>Karush-Kuhn-Tucker</i>	<i>Karush-Kuhn-Tucker</i>
IAD	<i>Intelligent assist device</i>	-----
FSR	<i>Force-sensing resistor</i>	<i>Capteur de force résistif</i>
RMSE	<i>Root-mean-square error</i>	-----
SVM	<i>Support vector machine</i>	<i>Machine à vecteurs de support</i>

NOMENCLATURES

Lettres latines

a_i	Coefficients du polynôme
\mathbf{a}_i	Vecteur de position cartésienne des enrouleurs
b_k	Coefficients du polynôme
\mathbf{b}_i	Vecteur de position cartésienne de la plateforme mobile
b	Paramètre de la fonction logistique
C	Amortissement virtuel du modèle d'admittance
d_i, d_j	Variables adimensionnelles
d_l, d_u	Paramètres des distances de la fonction logistique
\mathbf{d}_{ij}	Vecteur de distance entre deux câbles
\mathbf{F}	Vecteur de force
F_x, F_y, F_z	Force sur les axes (x, y, z)
F_u	Paramètres de force de la fonction logistique
\mathbf{H}	Matrice des moindres carrés non linéaires
\mathbf{h}	Matrice des moindres carrés linéaires
\mathbf{J}	Matrice jacobienne des vitesses linéaires et angulaires
L_c	Distance euclidienne
M	Masse virtuelle du modèle d'admittance
M_x, M_y, M_z	Moments de force sur les axes (x, y, z)
\mathbf{n}	Vecteur de point sur un plan
O	Occurrence liée au calcul du risque d'accident
P	Probabilité du risque d'accident
\mathbf{p}	Vecteur de position cartésienne
$\dot{\mathbf{p}}$	Vecteur des vitesses linéaires
\mathbf{q}	Vecteur des coordonnées articulaires

$\dot{\mathbf{q}}$	Vecteur des vitesses articulaires
$\ddot{\mathbf{q}}$	Vecteur des accélérations articulaires
\mathbf{Q}	Matrice de rotation entre deux repères
S	Sévérité liée au calcul du risque d'accident
t	Temps en seconde
$u(t)$	Configuration du manipulateur au moment t
$\dot{u}(t)$	Vitesse du manipulateur au moment t
$\ddot{u}(t)$	Accélération du manipulateur au moment t
w	Fréquence fondamentale
\mathbf{W}	Torseur
x, y, z	Cordonnées cartésienne
$\dot{\mathbf{X}}$	Vecteur des vitesses linaires et angulaires
\mathbf{Y}	Vecteur des points de la trajectoires

Lettres grecques

$\nabla \mathbf{F}_{ij}$	Vecteur unitaire du gradient force
$\nabla \mathbf{W}_{ij}$	Vecteur unitaire du gradient torseur
ε	Paramètre de la fonction logistique
$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{ij}$	Vecteur des coefficients estimés
λ	Multiplicateurs de Karush-Kuhn-Tucker
\mathbf{p}_i	Vecteur représentant le câble i
$\dot{\mathbf{p}}_i$	Vitesse articulaire du câble i
ϕ, θ, ψ	Cordonnées angulaires
$\boldsymbol{\omega}$	Vecteur de vitesses angulaires
$\boldsymbol{\Omega}$	Matrice antisymétrique

REMERCIEMENTS

Comme le dit si bien Stephen Hawking « Dans le domaine scientifique, trouver la bonne formulation d'un problème permet souvent de le résoudre. » et dans ce long cheminement de recherches, théories et mises en pratique, plusieurs personnes m'ont apporté leur aide ainsi que leur soutien et pour cela j'aimerais les remercier.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance envers mon directeur de recherche Professeur Martin Otis qui a su me faire confiance avec ce sujet de thèse et qui m'a donné la chance d'entreprendre des études de doctorat au sein du laboratoire d'automatique et de robotique interactive (LAR.i) de l'UQAC. Une expérience qui a été tout aussi enrichissante sur le plan personnel que professionnel. Sa présence et son soutien tout au long de ces années de doctorat m'ont été d'une très grande aide et m'ont permis de toujours vouloir me surpasser.

J'aimerais aussi remercier le Professeur Hassan Ezzaidi mon codirecteur de recherche qui a toujours eu des critiques constructives qui ont su me guider afin de présenter un travail minutieux.

Mes remerciements vont aussi au Professeur Philippe Cardou, directeur de stage au sein de l'Université Laval, pour son aide précieuse, ses conseils ainsi que sa disponibilité durant l'année de stage.

J'aimerais aussi remercier le laboratoire de robotique de l'université Laval pour m'avoir accueilli pendant une année ainsi que les personnels de laboratoire, du nom de Simon Foucault et Thierry Laliberté pour leurs conseils et leurs aides.

Je remercie aussi les membres du laboratoire LAR.i pour leurs amitiés et leurs soutiens indéfectibles, particulièrement Johannes C. Ayena.

Enfin, j'exprime toute ma gratitude envers mes frères pour leur soutien et surtout mes parents, pour tous leurs sacrifices et l'éducation qu'ils m'ont apportés pour faire de moi l'homme que je suis. Je remercie mes amis pour leurs encouragements. Mon dernier remerciement, mais non des moindres, va à ma charmante épouse qui a fait preuve de beaucoup de patience et qui m'a soutenu et conseillé tout au long de ce travail.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Généralités

Dès 1963, les robots industriels ont fait leur entrée dans l'industrie aux États-Unis puis en Europe et au Japon. Aujourd'hui, ils ont pris une place importante dans les moyens de production des entreprises. L'industrie automobile est la plus grande utilisatrice par ses constructeurs (GM, Ford, Honda, etc.), mais aussi par ses fournisseurs d'équipements et d'accessoires. Cependant, ces robots ont leurs limites lorsque la tâche demandée nécessite un degré élevé de perception, d'agilité ou de décision. La communauté scientifique propose des solutions d'interaction entre l'humain et le robot afin de réunir les qualités de décision et de perception humaine avec la force et l'endurance du manipulateur dans un même espace de travail [1]. Cette union résulte d'un domaine de recherche, parmi les plus dynamiques durant ces dernières années, qui est l'interaction humain-robot, ou plus communément appelé HRI pour *Human-Robot Interaction*. Ce dernier est un domaine de recherche multidisciplinaire avec des disciplines telles que l'intelligence artificielle, la robotique, la reconnaissance vocale, les sciences sociales (psychologie, sciences cognitives, anthropologie) et humaines (éthique et philosophie). Toutefois, le domaine HRI est un sous-ensemble du domaine de

l'interaction humain-machine (HCI- *Human-Computer Interaction*) [2]. D'après la définition de Hewett [3], le HCI est « *une discipline à la conception, à l'évaluation et à la mise en œuvre de systèmes informatiques interactifs à usage humain et à l'étude des phénomènes majeurs qui les entourent* ». On distingue dans ce domaine, trois types d'interfaces: les interfaces d'acquisitions, les interfaces de restitutions et les interfaces combinées. Le premier type d'interface permet de récupérer les actions données par l'humain à travers un actionneur (bouton, reconnaissance vocale, clavier, etc.). L'interface de restitution, permet quant à elle de produire les données du système ou machine à travers un appareil comme un écran ou une LED. La dernière interface correspond à une combinaison des deux interfaces (acquisition et restitution). En effet, ce type d'interface permet d'interagir avec la machine comme les écrans tactiles et les commandes à retour d'effort.

On retrouve dans le domaine HRI différents sous-domaines comme l'interaction physique qui consiste à interagir de manière directe, par le toucher avec le robot, ceci est appelé pHRI pour *Physical Human Robot Interaction*. En effet, dans une pHRI, les humains et les robots partagent le même espace de travail et sont en contact les uns avec les autres dans un fonctionnement normal. Les robots liés à ce type d'interaction physique sont conçus pour coexister et coopérer avec les humains dans des applications telles que la manipulation assistée, l'assemblage en collaboration, le travail domestique, le divertissement, la réadaptation et les applications médicales. Cependant, les robots doivent être capables de comprendre l'environnement et les intentions de l'humain et d'y répondre adéquatement de manière sécuritaire, intuitive, conviviale et ergonomique. Un exemple d'interaction physique

est l'haptique qui est reliée au sens du toucher. Ce domaine d'étude est composé de deux principales familles :

- les interfaces à retour d'effort (ou interfaces kinesthésiques) qui permettent de ressentir la position, les mouvements et les forces exercées (collisions, poids, viscosité) à l'aide de capteurs proprioceptifs situés sur le mécanisme. L'une de ces interfaces à retour d'effort sont les systèmes de téléopération. Elles sont utilisées dans diverses applications comme pour accéder à des lieux dangereux, distants ou inaccessibles (exemple : centrale nucléaire, espace et fonds sous-marins). La figure 1-1 illustre un exemple d'une interface a retour d'effort dédiée à la téléopération [4].



Figure 1-1 : Robot hydraulique maitre-esclave du CEA-LIST (P. Dumas, 2007)

- les interfaces tactiles qui permettent de ressentir la forme, la texture ou la température des objets à l'aide de différents types d'actionneurs situés au niveau de la peau. Cette sensation tactile peut se traduire par une pression, une vibration, un étirement de la peau et une douleur perçue à travers la peau. Un exemple est présenté à la figure 1-2. Un autre domaine d'étude où l'interaction physique entre l'humain et le robot se développe est celui des exosquelettes. Ces derniers sont des structures mécaniques articulées possédant plusieurs degrés de liberté qui s'attachent extérieurement au corps humain et agissent en parallèle. En effet, ils peuvent être dédiés à une partie spécifique du corps comme la main, le bras, la jambe, ou à plusieurs membres à la fois [5]. Les exosquelettes sont utilisés dans différents types d'applications : amplificateur d'effort, système de réadaptation [6] et d'aide à la marche ou interface haptique [7], des exemples sont proposés à la figure 1-3.

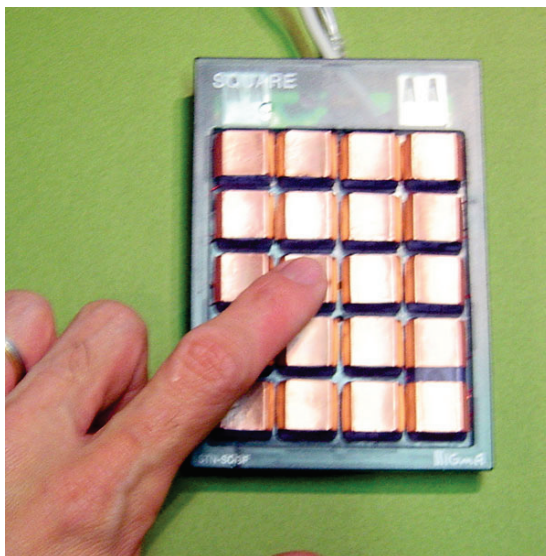
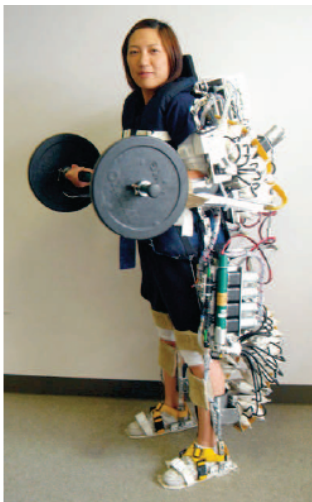
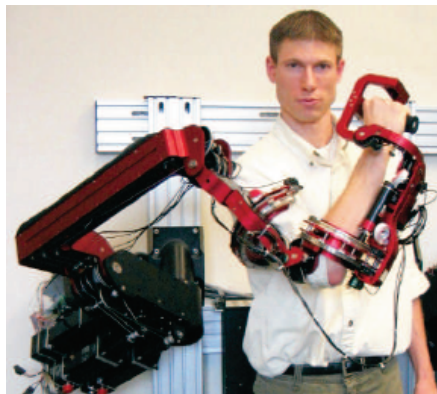


Figure 1-2 : Clavier tactile [8]

Enfin, une autre forme d'interaction est devenue très populaire : l'utilisation des robots à des fins sociales. On retrouve ces robots interactifs généralement comme plateformes de recherches, outils pédagogiques, aides thérapeutiques ou pour des applications domestiques telles que le nettoyage [9]. Toutefois, ces robots doivent être capables de s'exprimer, de percevoir des émotions, de communiquer par le dialogue, d'apprendre et de maintenir des relations sociales [10]. En d'autres termes, l'humain doit interagir avec le robot de la même façon qu'il interagit avec une autre personne. Dernièrement, de nouveaux travaux se développent sur la communication non verbale entre l'humain et le robot, par exemple les expressions de visage ou la communication par des gestes [11].



Power-Assist Suit
(Kanagawa)



UWash (Washington)



Armin (Zurich)

Figure 1-3 : Exemples d'exosquelettes [12]

En industrie, on retrouve deux principales formes de collaboration sans interaction physique, à savoir le partage des activités et le partage du temps et des activités dans un ordonnancement de production [13]. Dans la première forme, le robot et l'opérateur réalisent des tâches différentes dans le même espace de travail. Généralement, cette forme de coopération dispose d'une simple méthode d'évitement de collisions, soit l'arrêt du robot lorsque la distance de sécurité n'est pas respectée. Un exemple d'assemblage en coopération est présenté à la figure 1-4. Dans la seconde forme, l'opérateur et le robot sont en mesure d'exécuter conjointement une tâche de manutention ou d'interaction physique comme illustrée à la figure 1-5. En effet, des capteurs de forces et de couples sont disposés dans ce type de mécanisme robotique.

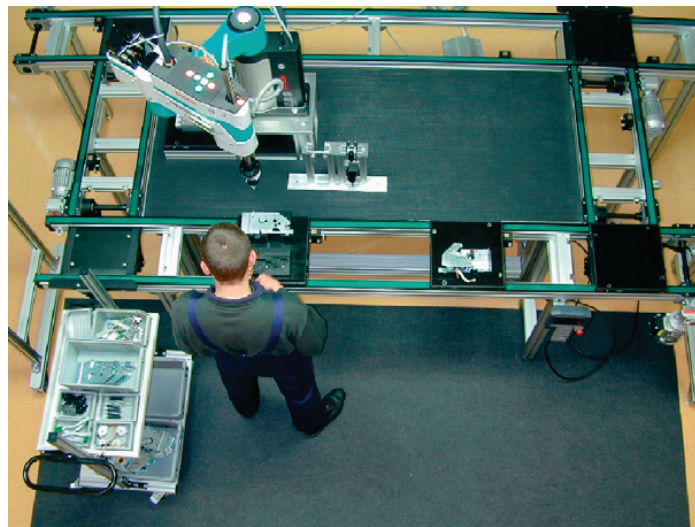


Figure 1-4 : Partage des activités dans un espace de travail hybride [13]

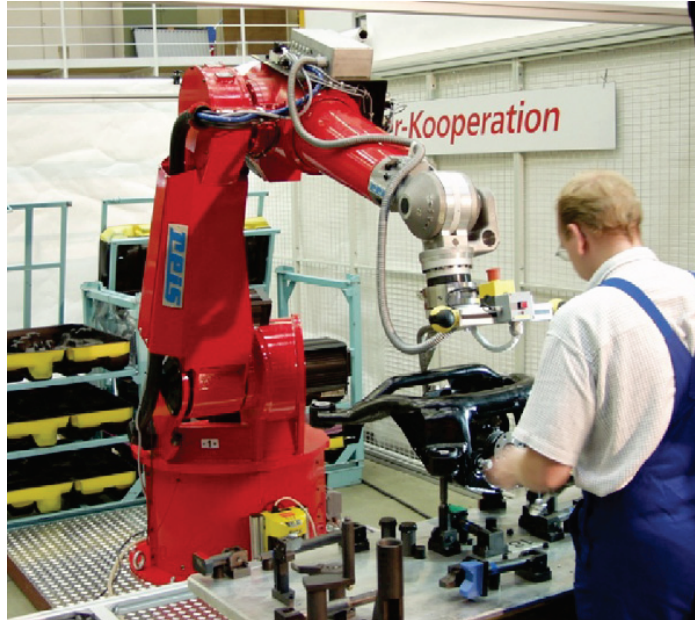


Figure 1-5 : Exemple de partage du temps des activités [14]

Les formes d'interaction avec contact physique se traduit principalement par des manipulateurs sériels. Ces robots sont répandus dans le milieu industriel, comme le COBOT pour *Collaborative Robot*, illustré à la figure 1-6. Ils sont utilisés pour aider les travailleurs à soulever, à déplacer les charges et à suivre la ligne d'assemblage. Ils peuvent également placer les charges rapidement, précisément et en toute sécurité. D'autres types de manipulateurs, appelés IAD pour *Intelligent Assist Device*, sont aussi utilisés. Ces manipulateurs sont caractérisés par un faible degré de liberté et sont commandés par un opérateur à l'aide de l'interaction physique [13].



Figure 1-6 : Robot assistant à la réparation de pneus (RB3D) [15]

La figure 1-7 présente une installation de tableau de bord par l'opérateur en utilisant un IAD. Ces deux systèmes sont principalement appliqués dans l'industrie automobile [16], toutefois, les COBOTs, à la différence des IADs, peuvent détecter et éviter les collisions avec l'environnement. Un manipulateur intrinsèquement sécuritaire, c'est-à-dire physiquement incapable d'être dangereux pour l'humain est illustré à la figure 1-8. Ce robot nommé LWR, III (*Light weight robot 3*) [17] est développé au centre aérospatial Allemand (DLR). Le LWR III est caractérisé par une faible inertie, une détection de couple dans chaque articulation et un excellent rapport entre la charge utile et la masse totale.



Figure 1-7 : Manipulateur assistant pour une tâche d'assemblage [13]



Figure 1-8 : Robot DLR (Light Weight Robot III) [17]

Les auteurs dans [18] présentent des essais de collisions utilisant ce robot où les résultats obtenus ont prouvé qu'un impact par objet contondant entre l'humain et le robot ne cause pas de dommage grave. Toutefois, il peut causer des dommages sérieux dans le cas d'un impact à la tête. En outre, ce manipulateur est limité à de petites tâches industrielles où la charge utile est restreinte. La plupart des manipulateurs dédiés à l'interaction disposent de plusieurs capteurs internes supplémentaires, comme de force ou de couple, pour assurer la sécurité de l'opérateur humain. De plus, ils sont basés principalement sur une structure sériels où les tâches qui demandent de grandes accélérations sont limitées puisqu'ils peuvent générer une inertie importante [19].

Un peu moins répandu que les manipulateurs sériels, les robots parallèles sont aussi utilisés en industrie. Ces mécanismes sont reliés à une base mobile, communément appelée plateforme mobile, par des chaînes cinématiques indépendantes où chaque chaîne contient un ou plusieurs corps rigides. Contrairement aux manipulateurs sériels, ces mécanismes forment une chaîne fermée dont la pose (position et rotation) de l'effecteur est déterminée par des corps rigides extensibles. L'avantage de ces mécanismes réside dans leur capacité à produire des déplacements hautement dynamiques avec de grandes accélérations ou des tâches nécessitant un rapport charge utile-poids important [20]. Une comparaison entre les robots parallèles et sériels est proposée dans [19]. L'un des robots parallèles, probablement le plus connu, est la plateforme de Gough-Stewart [21, 22]. Un simulateur de vol de la compagnie Lufthansa basé sur cette architecture est présenté à la figure 1-9. La figure 1-10 illustre un robot parallèle industriel à trois degrés de liberté en translation.



Figure 1-9 : Simulateur de vol, Lufthansa



Figure 1-10 : FlexPicker, ABB [23]

Une liaison rotoïde relie la plateforme mobile à un parallélogramme, qui est relié aussi avec des liaisons rotoïdes à chaque moteur à travers des leviers. Ce robot réalise des tâches industrielles avec précision et rapidité [23]. Cependant, l'inconvénient majeur des robots parallèles est la limite de l'espace de travail.

Dans la famille des robots parallèles, on retrouve les mécanismes parallèles entraînés par des câbles (MPEC) qui admettent un plus grand espace de travail et qui peuvent aussi produire de grandes accélérations [24, 25]. Toutefois, la conception de ces mécanismes diffère de celle des manipulateurs parallèles puisque les corps rigides sont remplacés par des câbles enroulés à des enrouleurs. En outre, la réalisation de ces systèmes est plus facile à mettre en œuvre [26]. Comme les robots parallèles standard, les MPEC forment une chaîne fermée. Par contre, la pose de la plateforme mobile est déterminée en contrôlant la longueur des câbles actionnés par des moteurs.

Principalement, deux types de configuration se distinguent dans les mécanismes entraînés par des câbles: la première est une configuration suspendue où les câbles dirigent et retiennent la partie supérieure de la plateforme mobile. L'un des avantages est que la gravité et le poids de la plateforme sont utilisés pour maintenir les câbles en tension, même que parfois la gravité est considérée comme un câble supplémentaire qui agit verticalement par rapport à la plateforme. Cependant, l'un des inconvénients est l'accélération verticale qui est générée uniquement par la gravité [24]. Un des mécanismes suspendus connus du grand public, illustré à la figure 1-11, est le Skycam [27]. Ce dernier contient quatre câbles reliés à

une plateforme mobile qui permet de déplacer une caméra couvrant un espace de jeu comme un terrain de football.

La deuxième configuration est un MPEC complètement contraint, où la pose de la plateforme mobile est complètement déterminée et définie par les contraintes géométriques comme la longueur des câbles. Afin de contrôler pleinement les degrés de liberté et garantir un équilibre statique, le nombre de câbles est redondant. En effet, puisque les câbles ne peuvent pas pousser, généralement au moins $N+1$ câbles sont utilisés avec N qui est le nombre de degrés de liberté désiré [28]. Cependant, ce type de configuration a de meilleurs résultats dans la précision de positionnement et la réduction de vibrations. Par conséquent, les MPEC pleinement contraints ont généralement de meilleures performances dans des applications à grande vitesse et/ou accélération par rapport aux mécanismes suspendus [29].

Un exemple de configuration pleinement contraint est proposé à la figure 1-12. Ce prototype peut produire des vitesses élevées sur un grand espace de travail à travers ses huit câbles [30, 31]. Un autre mécanisme dirigé par huit câbles présenté à la figure 1-13, peut aussi produire de grandes vitesses sur un grand espace de travail [32, 33]. En outre, la capacité de charge utile peut atteindre 500 kg sur ce MPEC [34]. Cependant, plusieurs problématiques sont détectées dans ce type de mécanismes comme les tensions minimales dans les câbles qui doivent être considérées pour éviter le fléchissement [35, 36], ou la calibration du MPEC afin d'éviter les erreurs de positionnement [37, 38].



Figure 1-11 : Système Skaycam basé sur un MPEC [27]

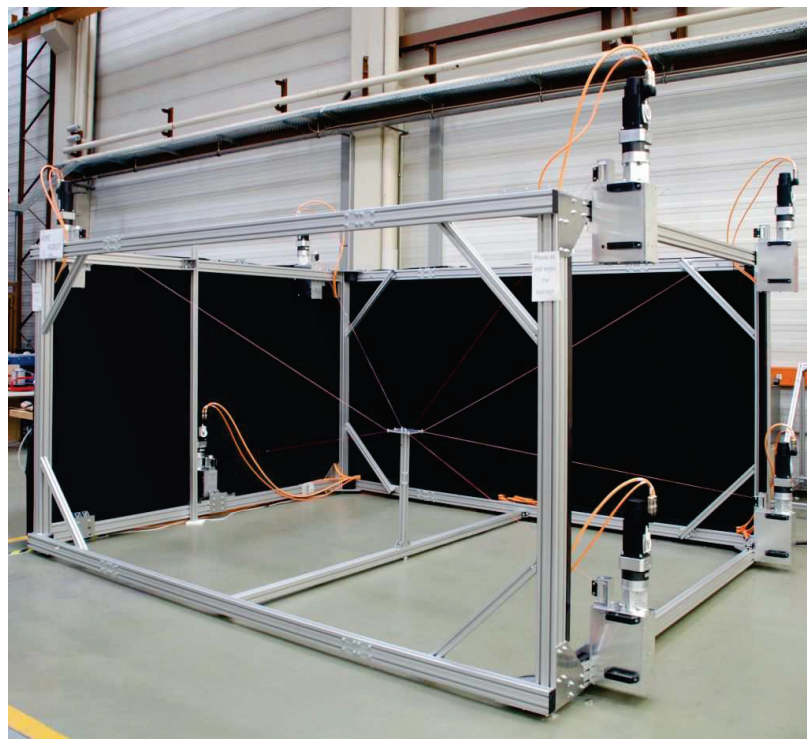


Figure 1-12 : Mécanisme pleinement contraint, IPAnema [30]



Figure 1-13 : Projet CoGiRo, LIRMM [32]

Le développement de manipulateurs industriels sériels semble atteindre des limites en termes de performance et d'amélioration. Les MPEC pourraient être une solution adaptée afin d'améliorer ou d'optimiser un procédé industriel. Ils constituent donc un des éléments à fort potentiel dans le développement industriel. Cette thèse propose l'étude d'un système interactif qui peut s'adapter sur les mécanismes parallèles entraînés par des câbles sans apporter de modification ou ajouter des capteurs internes. Les sections suivantes présentent la problématique liée au sujet de recherche, les objectifs et les différentes contributions, ainsi que la méthodologie.

1.2 Problématique

Après des années de recherches sur les robots sériels en industrie, il semble que le potentiel d'amélioration des gains de performance soit épuisé [30]. Contrairement aux bras manipulateurs industriels, les mécanismes parallèles entraînés par des câbles permettent de pallier les problématiques telles que l'espace de travail, la charge utile et les déplacements dynamiques. De plus, le changement ou la modification de tâches ou d'activités est plus facile à mettre en œuvre que sur les robots sériels. En effet, il suffit uniquement de changer la plateforme mobile et de programmer la nouvelle application au lieu d'échanger par exemple le robot industriel en place. En outre, de nouveaux besoins émergents conduisent au développement de nouvelles chaînes de production flexible et réactive favorisant ainsi la production de petites quantités ou la modification rapide des caractéristiques des produits. La solution consiste à adapter le manipulateur industriel pour permettre une interaction afin de réunir les qualités humaines avec celle du mécanisme dans un même espace de travail. De plus, l'utilisation de mécanismes interactifs permettrait de favoriser la réduction des efforts physiques et des mouvements répétitifs de manière à réduire l'apparition des symptômes liés aux troubles musculosquelettiques (TMS) [39].

Cependant, l'utilisation de manipulateurs industriels pour réaliser une tâche en interaction avec l'humain peut générer des accidents de travail et des maladies professionnelles. D'après une récente étude [40], la source d'accident la plus fréquente dans l'industrie est une collision entre l'opérateur et une partie mobile du robot. Une autre étude

indique aussi que l'erreur humaine est responsable de près de 20% des accidents [41]. En effet, certains états mentaux, comme la fatigue, la somnolence, le stress et la baisse de concentration augmentent le risque d'accident, surtout chez les travailleurs de quarts en raison des longues heures de travail. L'écrasement contre un objet et le coincement des doigts de la main entre deux composants d'une machine (convoyeur, engrenage, etc.) est aussi une des causes d'accidents les plus fréquentes dans l'industrie. À l'avenir, le rapprochement continuuel entre l'opérateur et un mécanisme ou un robot lors d'une tâche de manutention augmentera ce risque [42]. Toutefois, afin d'éviter les accidents, la plupart des manipulateurs industriels ont adopté des mesures de sécurité conformes aux normes afin d'assurer la protection des humains contre un robot ou une machine [43, 44]. La pratique d'aujourd'hui dans la plupart des cas est d'empêcher l'humain d'accéder à l'espace de travail du mécanisme ou d'arrêter les machines lorsque les capteurs externes détectent un événement imprévu dans l'espace de travail. Néanmoins, les recommandations des normes de sécurité, comme CAN/CSA-Z434-03, peuvent s'avérer insuffisantes ou inadaptées à des fins d'interaction dans une cellule hybride. Par conséquent, une nouvelle problématique s'ajoute au « défi de l'interaction » des mécanismes autonomes qui est de garantir la sécurité de l'opérateur [45, 46] dans un espace de travail partagé ou espace hybride.

L'étude d'un tel système représente un défi majeur et un enjeu primordial pour assurer le développement continuuel et optimiser des tâches industrielles en termes de production. Il est donc nécessaire d'évaluer l'aspect sécuritaire dans une cellule hybride et d'étudier de nouvelles méthodes adaptées à des mécanismes parallèles entraînés par des câbles. En outre,

il semble que la littérature scientifique reste limitée dans l'étude de ce type de système. Ce projet de thèse amène une réponse à la problématique énoncée précédemment, proposant ainsi un système interactif permettant d'améliorer la sécurité et l'intuitivité de l'opérateur pendant une interaction avec un MPEC.

1.3 Objectifs du projet de recherche

L'objectif de cette thèse est d'une part de réduire le risque d'accident dans l'industrie en proposant des méthodes d'évitement de collisions et des solutions aux réactions indésirables pendant les mouvements coopératifs. D'autres parts, elle propose d'améliorer l'intuitivité des mouvements à travers une stratégie de commande et en utilisant un vêtement intelligent pour activer ou désactiver des modes d'interaction. Ce projet de recherche propose d'explorer différentes méthodes d'interaction en utilisant un mécanisme parallèle entraîné par des câbles ainsi qu'un espace de travail hybride. À partir de cet objectif principal, différents objectifs spécifiques en découlent et sont présentés dans les points suivants :

- proposition d'un système de sécurité flexible qui s'installe sur les mécanismes industriels sans apporter de modification dans la structure mécanique;
- étude d'une stratégie de génération de trajectoires appliquée à un environnement dynamique avec une évaluation de la géométrie de l'obstacle;

- proposition d'une approche pour la gestion des interférences entre les câbles et production de mouvements coopératifs, en adaptant la commande pour éviter des gestes imprévus;
- introduction d'une nouvelle approche de calcul de distance minimale entre les câbles;
- utilisation d'une semelle instrumentée pour la détection de geste du pied et la mise en place d'une méthode permettant le changement de mode d'interaction et,
- utilisation d'un casque de sécurité pour la détection et la reconnaissance des activités pendant l'interaction, et proposition d'une méthode de calcul du risque d'accident.

Afin de réaliser ce système et ces objectifs, il convient d'identifier les étapes qui seront utilisées pour y arriver et de sélectionner des critères permettant d'améliorer la sécurité et l'intuitivité des mouvements. Il sera alors possible d'optimiser le système afin de maximiser les gains en termes de sécurité et d'intuitivité.

1.4 Méthodologie de recherche

La méthodologie expérimentale adoptée est caractérisée par quatre volets. Le premier volet discute d'une méthode de génération de trajectoires sécuritaires pendant le partage des activités dans une cellule de travail hybride. Avant de proposer une approche, il convient d'étudier une activité de production en collaboration avec un manipulateur et d'identifier les différentes contraintes. Ces dernières sont définies par des contraintes temporelles,

environnementales, mécaniques et géométriques. Du côté de l'opérateur, il est primordial d'évaluer la situation pendant l'interaction comme la distance entre un de ces membres et celui du manipulateur. Après avoir déterminé l'activité et le procédé industriel, une méthode est étudiée en respectant les contraintes définies au préalable. La sélection d'une approche se conclut par la mise en œuvre et des simulations.

Le deuxième volet porte sur l'étude d'une stratégie de commande qui permet à l'opérateur d'interagir physiquement avec un MPEC. Cette commande apporte aussi une solution pour produire des mouvements hautement intuitifs basés sur l'intention de l'opérateur. Une première analyse mathématique sur le mécanisme permet de définir les modèles géométrique, cinématique et dynamique. Un modèle de commande est ensuite étudié pour traduire les intentions de l'opérateur à partir d'un capteur de force. Dans une interaction physique avec un manipulateur, la trajectoire dépend des actions humaines qui pourrait être considérée comme un point de consigne dans une entrée de commande. Par conséquent, le mécanisme doit réagir de manière prévisible et sécuritaire et la commande de manière intuitive. La stratégie étudiée se concentre sur la gestion des interférences entre les câbles puisque la collision entre ces derniers peut provoquer des situations irrégulières. Cependant, il est important d'identifier les câbles en interférence et de déterminer la distance entre chaque paire de câbles en temps réel. En premier lieu, l'approche est validée sur un mécanisme parallèle entraîné par des câbles à travers des expérimentations en considérant les translations uniquement. En second lieu, les rotations sont intégrées à la méthode qui est validée à travers des simulations.

Toutefois, afin d'optimiser un système interactif, il est nécessaire d'intégrer et de distinguer entre les modes d'interaction et de permettre le changement de manière intuitif et sécuritaire. En effet, dans un procédé industriel partagé, l'opérateur peut utiliser le manipulateur pour le partage des tâches comme l'assemblage en coopération ou pour de l'interaction physique, par exemple, soulever des charges lourdes. Le troisième volet propose un algorithme de sélection qui permet le changement de mode intuitivement en utilisant une semelle instrumentée [47] pour la détection de gestes. Tout d'abord, il convient de classifier le geste afin de le définir de manière précise, facile et surtout intuitive dédiée à tous les utilisateurs sans forcément avoir suivi au préalable une formation dans le domaine. Ensuite, un modèle d'identification du geste est établi afin de détecter le mouvement et de sélectionner le mode d'interaction en temps réel.

Le dernier volet permet d'explorer les aspects d'évaluation de la situation de l'opérateur pendant l'interaction et de déterminer si l'interaction est sécuritaire et adéquate à travers un algorithme. Dans ce dernier, différents éléments sont considérés comme la fatigue, la reconnaissance des activités où ces données sont récupérées à travers un casque de sécurité instrumenté [48]. Un critère permettant d'évaluer les risques de progression des TMS (troubles musculosquelettiques) utilisant une semelle instrumentée pourrait aussi être exploré. La section suivante présente les contributions de ce projet de recherche.

1.5 Originalité de la thèse

Plusieurs éléments doivent être pris en considération afin d'optimiser un système sécuritaire et intuitif pour l'interaction entre l'humain et le mécanisme. La figure 1-14 résume les principales contributions de ce projet de recherche. Deux types d'interaction sont étudiés: le partage des activités et l'interaction physique.

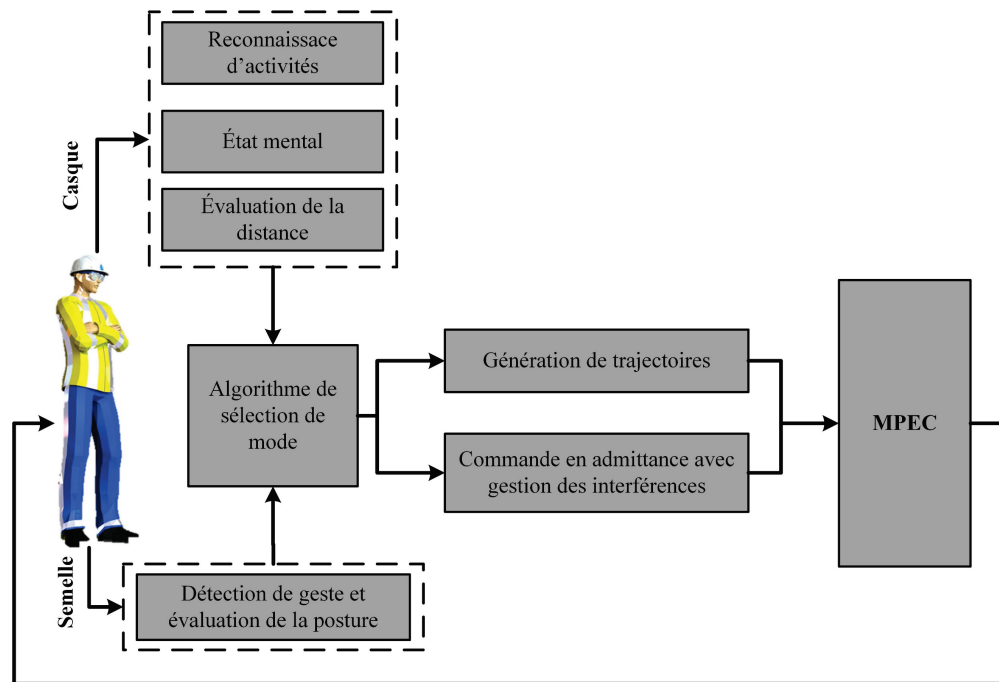


Figure 1-14 : Système interactif sécuritaire proposé

Une nouvelle méthode de génération de trajectoires est proposée afin d'améliorer la sécurité de l'opérateur pendant le partage des activités dans une cellule de travail hybride. Cette approche est basée sur un réseau de neurones qui permet de produire des points de

passages pour éviter les collisions. L'effecteur du mécanisme suit un chemin dans l'espace opérationnel à travers ces points de passage qui sont reliés par un polynôme quintique (de degré cinq). En outre, la géométrie déformable de l'obstacle et l'environnement dynamique sont pris en compte dans la méthode.

Une deuxième contribution est dédiée à l'étude d'une stratégie de commande interactive incluant une gestion des interférences pendant l'interaction physique. Cette stratégie de commande propose d'introduire une force de répulsion afin de gérer le point d'interférence et ainsi éviter le croisement et le pliage des câbles. Par ce fait, la tâche est exécutée jusqu'aux limites des possibilités géométriques et cinématiques du mécanisme. En outre, afin de déterminer la distance minimale entre les câbles et d'identifier ceux qui sont en interférence, une méthode basée sur les conditions de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) est définie.

L'utilisation de vêtements intelligents comme une semelle instrumentée pour changer de manière intuitive le mode d'interaction, est une autre contribution originale dans ce projet de recherche. Cette semelle permet de détecter les gestes de l'opérateur en temps réel en utilisant des capteurs de forces FSR ainsi qu'un accéléromètre. Les données récupérées sont traitées et comparées avec un modèle d'identification de geste. Ce dernier est développé à partir d'une interpolation polynomiale et d'une optimisation de paramètres en utilisant les moindres carrés non linéaires. L'algorithme permet d'activer le mode d'interaction physique selon du résultat de l'identification. Un autre vêtement intelligent basé sur un casque de

sécurité instrumentée est aussi utilisé pour l'évaluation de l'état de l'opérateur pendant l'interaction. Cet appareil permet une reconnaissance des activités, une évaluation de l'état mental ainsi qu'une estimation de la position. Les données provenant des capteurs du casque, accéléromètre et EEG, sont utilisées pour calculer un niveau de risque d'accident et pour déterminer la position de l'opérateur dans l'environnement.

1.6 Contenu de la thèse

Après l'introduction du premier chapitre dans lequel des généralités, la problématique ainsi que les objectifs ont été abordés, le reste de la thèse est divisée en six chapitres et consacrée à la présentation et à la validation des différentes approches. Par ailleurs, la figure 1-15 illustre la structure de la thèse et le contenu des différentes sections. Dans le chapitre deux, une première contribution est abordée, on y trouve une revue de littérature sur la génération de trajectoire ainsi que l'évitement de collisions. Après une introduction sur les polynômes d'interpolation, la méthode retenue pour la génération de trajectoires sécuritaires est présentée. Le chapitre se conclut par des simulations et discussions des résultats.

Le chapitre trois présente le mécanisme entraîné par sept câbles utilisé lors des expérimentations. La modélisation mathématique est ensuite abordée ainsi qu'une analyse du point d'interférence entre les câbles. À la suite de résultats annoncés au chapitre 2, une deuxième contribution de ce projet de recherche est exposée, à savoir une méthode de calcul de distance minimale entre les câbles.

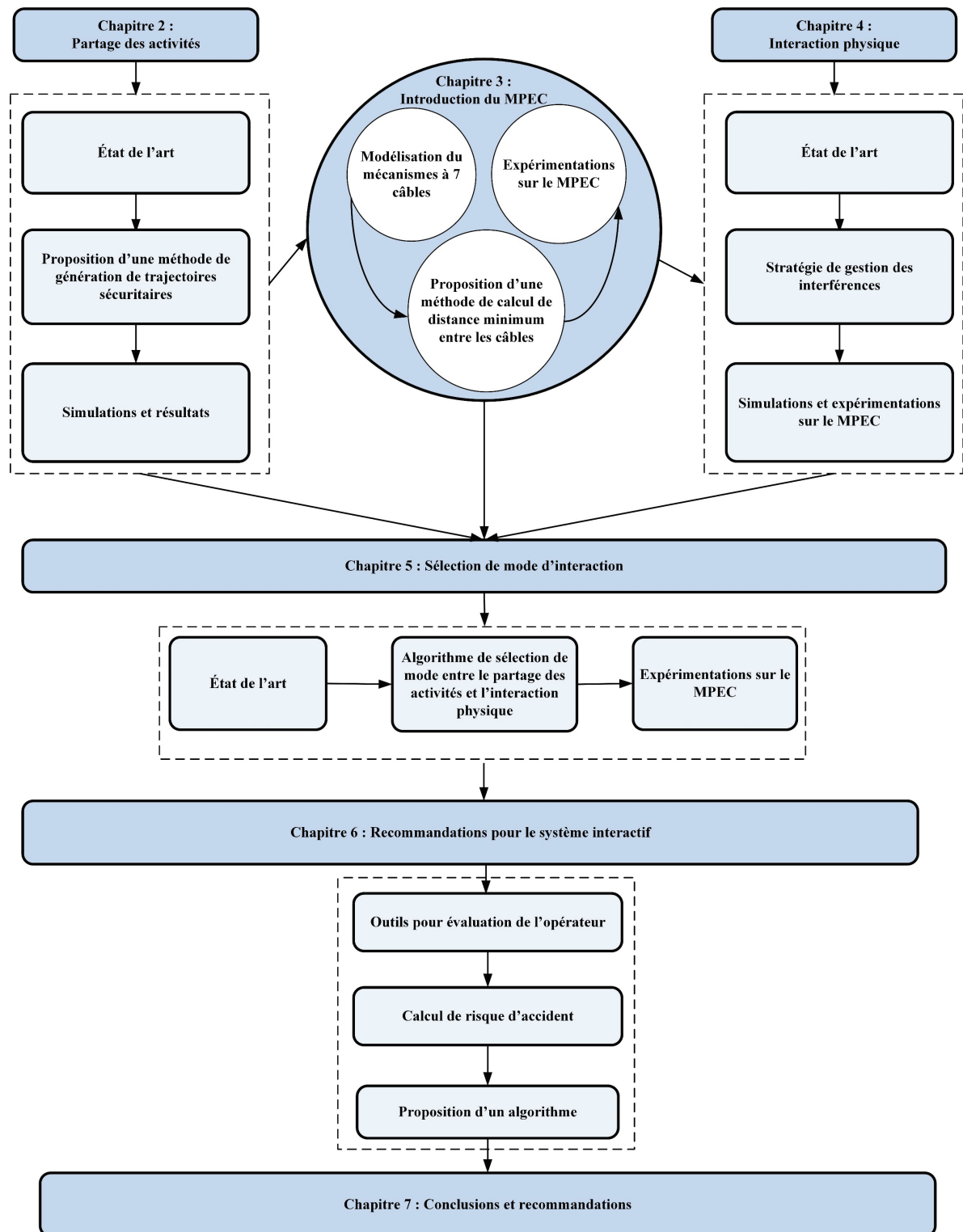


Figure 1-15 : Structure de la thèse

Après l'analyse et la formulation mathématique, le chapitre quatre aborde une revue de littérature sur les interférences entre les câbles et une autre contribution au projet. Cette dernière consiste à l'étude d'une stratégie de commande interactive qui permet de gérer les interférences pendant l'interaction physique. Dans un premier temps, les rotations sont considérées dans l'approche où cette dernière est validée à travers des simulations. Ensuite, une autre solution est abordée en tenant compte uniquement des translations. Cette solution est appliquée sur le mécanisme entraîné par sept câbles et les résultats sont ainsi présentés et discutés dans cette partie.

Le chapitre cinq débute par un état de l'art sur les différentes approches permettant de sélectionner des modes d'interaction. Par la suite, la dernière contribution est décrite qui consiste en un algorithme de sélection de mode utilisant un vêtement intelligent et une identification de geste. Afin de pratiquer des expérimentations sur le MPEC introduit au chapitre 3, une mise en œuvre de l'algorithme est proposée et les résultats sont discutés à la fin de ce chapitre.

Dans le chapitre six, l'intégration d'autres éléments dans le système interactif est présentée. Les éléments ajoutés permettent de prendre en considération l'état mental à travers un casque de sécurité instrumenté ainsi que la progression des TMS de l'opérateur. Entre autres, ce chapitre discute de la reconnaissance d'activités et expose des résultats partiels émanant d'expérimentations pratiquées sur une plateforme hybride. Enfin, le chapitre sept présente les conclusions générales ainsi que les recommandations pour des travaux futurs.

CHAPITRE 2

PARTAGE DES ACTIVITÉS DE PRODUCTION EN COLLABORATION HUMAIN-MANIPULATEUR

Dans le contexte de partage des activités entre un manipulateur et un humain, la question de génération de trajectoires sécuritaires devient, pour des considérations évidentes de sécurité, une préoccupation prioritaire. Par conséquent, il est nécessaire de prendre en considération certains éléments permettant d'assurer la sécurité de l'opérateur et le bon fonctionnement du robot. Ces éléments se traduisent par l'environnement dynamique, la géométrie déformable de l'obstacle ainsi que les contraintes cinématiques et géométriques du manipulateur. Ce chapitre propose en premier lieu, une revue de littérature sur la génération de trajectoires et l'évitement de collisions. Une attention particulière est portée aux méthodes utilisant les réseaux de neurones. En second lieu, une stratégie de génération de trajectoires sécuritaires est proposée en respectant les différentes contraintes telles que les mouvements humains. Des simulations ont été pratiquées afin de valider la stratégie et une discussion des résultats est proposée à la dernière section de ce chapitre.

2.1 Introduction

Trois facteurs doivent être pris en compte pour éviter l'accident durant l'interaction entre l'humain et le manipulateur [49], la capacité du système de détection et d'évitement des collisions, le facteur humain et le facteur environnemental comme les hautes températures qui peuvent détériorer les capteurs du manipulateur. Dans cette étude, nous proposons une approche de génération de trajectoires, où l'effecteur du mécanisme suit un chemin dans l'espace opérationnel à travers des points de passage afin d'éviter les collisions. La génération de mouvements a été largement étudiée, les ouvrages [50-52] en proposent une synthèse détaillée.

Cependant, il est nécessaire de distinguer entre une planification de chemin et une génération de trajectoires. La planification de chemins a tendance à définir des stratégies de navigation comme l'algorithme A*[53] ou roadmap [54]. Par contre, la génération de trajectoires définit des contraintes de vitesse, d'accélération et de temps [55]. En outre, elle est généralement définie en quatre classes, telle illustrée au tableau 2-1. Les classes deux et quatre sont principalement appliquées pour l'évitement d'obstacles.

Tableau 2-1 : Classifications des types de trajectoires

N°	Classes de trajectoires	Définitions
1	Trajectoire opérationnelle	Le mouvement se réalise entre deux points avec une trajectoire libre
2	Point à point	Le mouvement se réalise à travers des points intermédiaires avec une liberté de déplacement
3	Trajectoire opérationnelle avec contraintes	Le déplacement se réalise avec des contraintes géométriques et cinématiques. Par exemple, le manipulateur est contraint de suivre une trajectoire rectiligne.
4	Point à point avec contraintes	La trajectoire est effectuée à travers des points intermédiaires en appliquant des contraintes entre les points.

En effet, le point intermédiaire permet de dévier la trajectoire de son chemin initial et ainsi contourner les obstacles. Cependant, ces trajectoires peuvent être générées dans l'espace cartésien (opérationnel) ou articulaire.

2.1.1 Génération de trajectoires dans l'espace articulaire et opérationnel

D'un côté, la génération de trajectoires dans l'espace articulaire consiste à définir un chemin entre une configuration initiale et une configuration finale où le mouvement du manipulateur est produit en indiquant les valeurs des paramètres des articulations. La figure 2-1 illustre la commande dans l'espace articulaire où \mathbf{q} , $\dot{\mathbf{q}}$ et $\ddot{\mathbf{q}}$ représentent respectivement

la configuration désirée, la vitesse et l'accélération angulaire. Le principal avantage de cette commande est qu'elle ne requière pas de calculs du modèle géométrique et cinématique inverse qui peut être problématique dans une génération en temps réel. Toutefois, l'inconvénient est dans la géométrie de la trajectoire de l'organe terminal qui est imprévisible et dynamique. Par conséquent, le risque de collisions est élevé dans un environnement encombré.

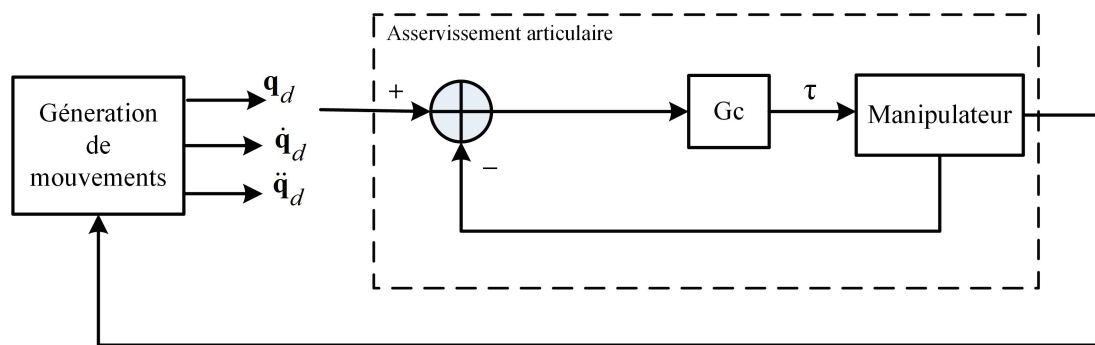


Figure 2-1 : Génération de trajectoires dans l'espace articulaire

D'un autre côté, la génération de trajectoires dans l'espace opérationnel permet de contrôler la géométrie de la trajectoire de l'effecteur en suivant un mouvement défini tel qu'une ligne droite ou un arc de cercle. L'un des inconvénients de cette commande est qu'elle implique une transformation en coordonnées articulaires de chaque point de la trajectoire. La figure 2-2 illustre la commande dans l'espace opérationnel. Toutefois, afin de réaliser un déplacement dans l'espace de travail entre deux positions, il est nécessaire de produire un ensemble de points liés, dans lequel le chemin est calculé. Ce chemin est caractérisé par une séquence de points définis soit, dans l'espace opérationnel (cartésien), soit dans l'espace

articulaire (espace des configurations). Pratiquement, la génération de trajectoires est une fonction de calcul des consignes désirées articulaires ou cartésiennes, en fonction du temps.

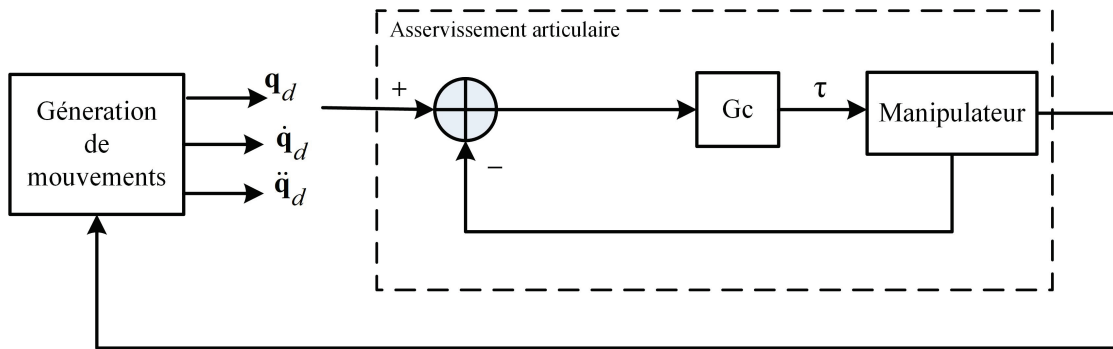


Figure 2-2 : Génération de trajectoires dans l'espace cartésien

Par conséquent, un ensemble de liens de contraintes est synthétisé dans lequel un chemin peut être calculé afin de déplacer l'effecteur à l'intérieur d'une grille où chaque sous-espace correspond à une position. La section suivante introduit cette fonction, à savoir le polynôme d'interpolation.

2.1.2 Interpolation polynomiale

L'équation du mouvement entre deux positions est caractérisée par des contraintes spatiales et temporelles. Ces contraintes se définissent par des fonctions nommées « fonctions d'interpolation », qui permettent de satisfaire le passage entre deux positions, en d'autres termes, les fonctions d'interpolations permettent de définir la trajectoire en fonction

du temps en calculant les consignes admissibles. Paul [56] et Tylor et al. [57] sont des références classiques sur la génération de trajectoires dans l'espace cartésien. Paul propose une matrice de passage entre deux points dans l'espace de l'effecteur en faisant des interpolations en ligne droite et des rotations autour d'un axe fixe. Tandis que Taylor propose d'utiliser des quaternions pour représenter les rotations. Cependant, les lois d'accélération de ces deux méthodes sont de type bang-bang, ce qui implique une accélération discontinue. Pour avoir un mouvement continu en accélération, Castain et al. [58] proposent une loi trapézoïdale en accélération.

Généralement, les fonctions splines et les polynômes d'interpolations sont les plus utilisés. Par exemple [59] propose un polynôme quadratique pour générer un déplacement avec contraintes à travers des points intermédiaires. Cependant, cette approche est appliquée dans un environnement statique. Fang et al. proposent une méthode simulée en réalité augmentée à base d'une spline cubique [60]. La trajectoire est aussi générée à travers des points intermédiaires. Enfin [61] propose une combinaison d'une spline cubique appliquée dans l'espace opérationnel et d'une B-spline dans l'espace articulaire afin de permettre un déplacement en respectant les contraintes.

Mathématiquement, le polynôme qui caractérise un déplacement en ligne droite est une équation linéaire dans le temps. Cette fonction est continue en position, mais discontinue en vitesse, par conséquent elle provoque des à-coups sur le manipulateur réel. Les polynômes les plus utilisés sont de degrés plus élevés, généralement de degré trois [62] ou de degré cinq

[63]. Le polynôme de degré trois permet de satisfaire les contraintes de vitesses, par contre, le polynôme de degré cinq assure la continuité en accélération. La forme polynomiale de degré cinq, communément appelée quintique, est décrite comme suit :

$$\begin{cases} u(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \\ \dot{u}(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 + 4a_4t^3 + 5a_5t^4 \\ \ddot{u}(t) = 2a_2 + 6a_3t + 12a_4t^2 + 20a_5t^3 \end{cases} \quad (2-1)$$

où $u(t)$, $\dot{u}(t)$, $\ddot{u}(t)$ représentent la configuration du manipulateur, la vitesse et l'accélération au moment t . Selon les conditions imposées, les coefficients $[a_0 \dots a_5]$ sont calculés. Généralement, les conditions aux limites sont définies comme suit :

$$u(t_0) = u_i, u(t_f) = u_f, \dot{u}(t_0) = 0, \dot{u}(t_f) = 0, \ddot{u}(t_0) = 0, \ddot{u}(t_f) = 0. \quad (2-2)$$

Ou u_i et u_f représentent la configuration initiale et finale, et t_0, t_f sont respectivement le temps initial et final. Le polynôme quintique constitue un outil très pratique pour le calcul de mouvement et pour assurer la continuité en position, vitesse et accélération. Toutefois, il est nécessaire aussi d'assurer la sécurité de l'opérateur dans l'espace de travail, et d'éviter les collisions avec des obstacles. Ainsi, la prochaine section discute de travaux de recherche antérieurs dans le domaine de l'évitement de collisions.

2.1.3 Algorithmes et méthode d'évitement de collisions

Plusieurs études ont été menées sur les stratégies de mouvements sans collisions appliquées dans un environnement dynamique. Une des plus célèbres est l'utilisation des champs potentiels [64, 65]. Cette méthode développée par Khatib en 1987, consiste à créer un champ de potentiel dans l'espace de travail du robot avec une force répulsive pour les obstacles et une force attractive pour la cible avec un déplacement du robot suivant le gradient du potentiel [66]. Toutefois, cette approche pourrait avoir une indétermination [67] lorsque les forces répulsives et attractives sont égales ou similaires. [68] proposent une stratégie en calculant une enveloppe convexe lisse autour de l'obstacle à éviter. La trajectoire suit cette forme jusqu'à ce que le but soit atteint. Cependant, les déplacements du manipulateur peuvent être limités, ainsi que l'espace de travail, puisque l'opérateur (obstacle) pourrait être entouré complètement par cette enveloppe. Par conséquent, la collaboration entre l'humain et le manipulateur n'est pas optimale. D'une manière générale, les algorithmes utilisés pour trouver un chemin sans collision demandent un temps de calcul important lorsque l'environnement est complexe et dynamique. L'une des solutions consiste à utiliser les réseaux de neurones pour trouver un chemin sans collision.

Dans le domaine de génération de mouvements utilisant les réseaux de neurones, on retrouve principalement deux catégories, soit la planification de mouvement à l'aide des réseaux de neurones [69, 70], soit des stratégies d'évitement de collisions pour lesquelles plusieurs études sont proposées. Par exemple, Silva et al. présentent une approche basée sur

un réseau de neurones modulaires nommée MONODA (*modular network for obstacle detection and avoidance*), qui permet la détection et l'évitement d'obstacle dans un environnement inconnu appliqué à des robots mobiles [71]. La structure est constituée de quatre modules, avec un réseau rétropropagation (*Back-propagation*) de trois couches dans chaque module. L'architecture est définie de sorte que chaque module corresponde à une direction du robot. Dans [72], les auteurs proposent une commande adaptative basée sur un réseau de neurones qui permet l'évitement d'obstacles dynamiques à géométrie variable. Les paramètres de l'équation dynamique du robot sont estimés dans le cas où la distance minimale entre l'obstacle et les segments du robot n'est pas respectée. Cependant, les distances sont calculées par rapport au centre de l'obstacle. Dans le cas où la forme est cylindrique, les distances sont difficiles à calculer. En effet, la longueur du cylindre n'est pas prise en compte, par conséquent, l'un des segments du robot peut rentrer en collision avec l'obstacle.

Un autre exemple appliqué à des drones propose une méthode basée sur l'apprentissage dynamique [73], où la sortie du réseau de neurones permet de sélectionner une direction sécuritaire. Cependant, ces approches sont appliquées dans un environnement statique. Duguleana et al. proposent une méthode de planification de chemins dans un environnement inconnu en combinant deux réseaux de neurones multicouches avec apprentissage dynamique [74]. Les poids du réseau de neurones sont mis à jour tout au long du mouvement en utilisant l'apprentissage Q-learning. La configuration du robot est générée par un des réseaux de neurones, tandis que l'autre résout la cinématique inverse du robot.

Toutefois, les poids du réseau sont réinitialisés à chaque fois que le nombre d'itérations maximum est atteint, dans certains cas le temps peut être important avant d'atteindre la position cible.

Les approches présentées proposent des résultats concluants, toutefois, dans le cadre d'une interaction entre le mécanisme et l'humain dans une cellule de travail hybride, où l'environnement est dynamique et connu, deux éléments essentiels doivent être pris en considération. Soit la géométrie déformable de l'obstacle qui se traduit par des mouvements imprévus de l'opérateur où un de ses membres peut se trouver sur le chemin du manipulateur. Dans ce cas, la trajectoire doit être corrigée rapidement afin d'éviter la collision. Soit des déplacements imprévisibles du mécanisme qui peuvent aussi provoquer des accidents, si les contraintes cinématiques et géométriques ne sont pas respectées. Pour arriver à résoudre cette problématique, la section suivante présente les méthodes et les algorithmes adoptés.

2.2 Génération de trajectoires pour l'évitement des collisions

La méthode proposée consiste à utiliser un réseau de neurones pour l'évitement de collisions en générant des points intermédiaires nécessaires. Les points sont reliés à l'aide d'un polynôme quintique. En outre, la stratégie permet de prendre en compte l'environnement dynamique ainsi que la géométrie déformable. Le processus d'évitement de collisions illustré à la figure 2-3 contient principalement trois étapes.

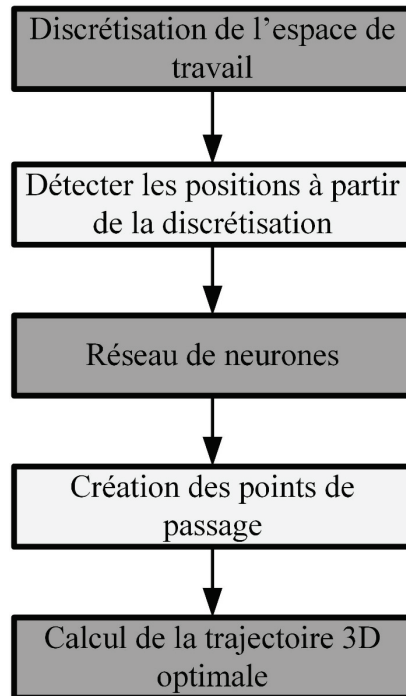


Figure 2-3 : Stratégie proposée pour l'évitement de collisions

La première étape consiste à récupérer les différentes positions détectées, dont la position initiale, finale ainsi que la géométrie de l'obstacle (humain) qui se traduit par trois positions. À savoir, la position de la tête et les positions des deux poignets. Ces positions sont récupérées par des capteurs situés sur les deux poignets ainsi que le casque de sécurité [75]. La seconde étape permet la création des points de passage nécessaires à l'évitement de collisions à partir de l'environnement discrétisé. Enfin, la dernière étape est de relier les points avec un polynôme quintique dans l'espace opérationnel. Cette section explique les trois étapes et propose un algorithme de génération de trajectoires en temps réel. En outre, des résultats de simulations sont aussi présentés à la dernière section de ce chapitre.

2.2.1 Discrétisation et codage de l'espace de travail

Dans notre approche, l'environnement dynamique est évalué sans caméra où les mouvements de l'humain sont imprévisibles. Une génération de trajectoires point à point permet de diriger l'effecteur vers une position dans l'espace de travail sans collision. Cependant, le temps de calcul devrait être minimum puisque l'algorithme est exécuté en temps réel. Par conséquent, afin de respecter ces exigences, la discrétisation de l'espace de travail semble être adaptée dans notre cas [76-79]. Un carré de cinq par cinq est utilisé afin de faciliter l'apprentissage et de couvrir l'espace de travail du manipulateur pour une tâche d'assemblage où les positions sont connues. Toutefois, le choix de la résolution est un compromis entre l'espace de collision, le temps de calcul et la complexité de l'architecture du réseau de neurones. Dans notre cas, l'espace de travail est discrétisé en cube de trois dimensions, soit cinq lignes, cinq colonnes et cinq plans pour un total de 125 données. La figure 2-4 illustre la discrétisation avec le codage des données. Celle de gauche représente un exemple de matrice 3D présentée à l'entrée du réseau avec les valeurs « 0.5 » et « -0.5 » qui correspondent aux positions de départ et d'arrivée. L'obstacle est représenté par la valeur « 1 » et les valeurs restantes « 0 » indiquent l'espace libre où le manipulateur peut se déplacer.

La figure de droite illustre le résultat correspondant à la discrétisation présentée à l'image de gauche avec la valeur « 1 » qui est le point de passage pour éviter l'obstacle. Cependant, afin de faciliter l'apprentissage et de détecter plus facilement les points de passage, le reste des éléments du cube 3D sont représentés par la valeur « -1 ». Plusieurs

configurations sont discrétisées en matrice afin de constituer la base de données pour l'apprentissage, un exemple est illustré à la figure 2-5. Dans cette figure, l'espace de travail est discrétisé en un cube de 125 éléments où les trois points rouges correspondent aux positions de la tête et des deux poignets. Cependant, dans ce cas la taille maximum correspond aux limites de la matrice. Par ailleurs, la résolution pourrait être augmentée, toutefois, ceci aura un impact sur la structure du réseau de neurones. La figure 2-6 illustre deux exemples où le bras gauche de l'opérateur est en mouvement.

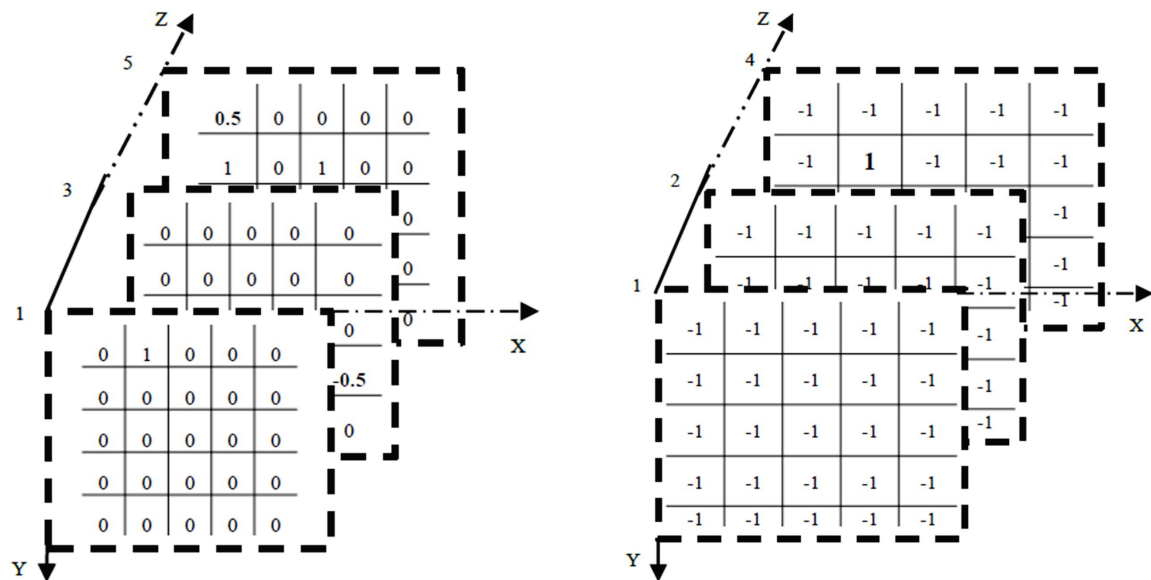


Figure 2-4 : Exemple d'espace de travail discrétisé en matrice 3D

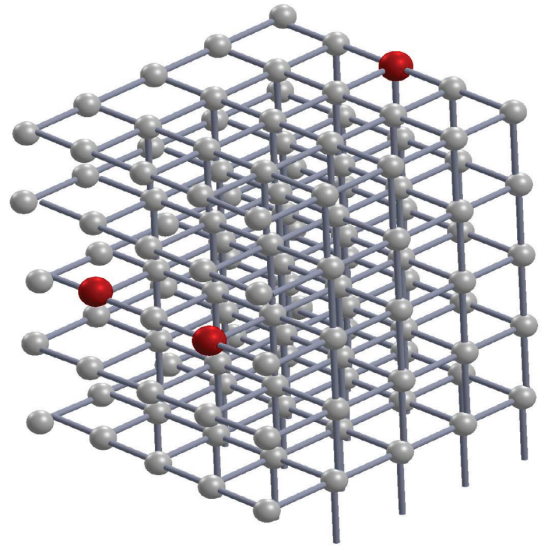
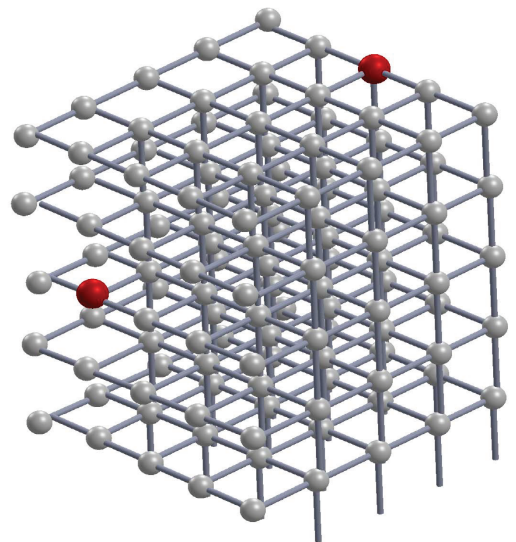


Figure 2-5 : Exemple de configuration discrétisée en 3D



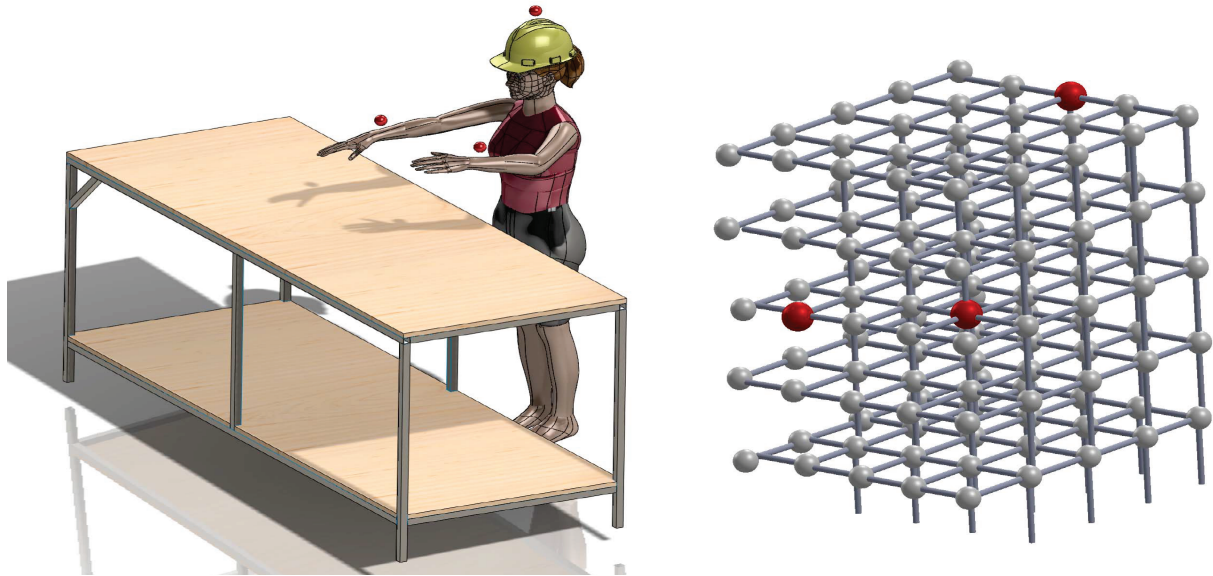


Figure 2-6 : Évaluation de la géométrie déformable

Lorsque l'environnement est complexe et dynamique, une des solutions consiste à utiliser les réseaux de neurones pour l'évitement de collisions. Toutefois, la conception de ce réseau est établie à partir de données d'apprentissage qui permettront ensuite de définir la structure ou le modèle.

2.2.2 Apprentissage du réseau de neurones

Les étapes d'apprentissage du réseau de neurones sont définies comme suit : en premier lieu, de nombreuses situations sont discrétisées en matrices tel que présenté sur la figure 2-4 pour créer une base de données d'apprentissage. Les entrées correspondent aux

configurations lors de la collaboration dans une activité industrielle discrétisée en matrice. Chaque configuration correspond aux positions des poignets et de la tête de l'opérateur suite à un mouvement dans l'espace de travail. Les sorties correspondent aux matrices contenant les positions des points intermédiaires générées aléatoirement afin de suivre un chemin sans collision. En effet, pour chaque configuration un premier point est proposé puis vérifié. Si la collision persiste, une nouvelle position de points intermédiaires est introduite jusqu'à ce qu'une solution valide soit trouvée. En second lieu, un algorithme de rétropropagation basé sur la descente en gradient est utilisé pour l'apprentissage. Si la réponse de sortie est différente de celle souhaitée, une erreur est calculée, et rétropropagée aux couches cachées. Pendant cette phase, les valeurs de poids sont ajustées et affinées en continu. Ensuite, plusieurs combinaisons de structures de réseau sont testées afin de déterminer le meilleur taux d'apprentissage. La figure 2-7 illustre la structure du réseau de neurones avec l'entrée et la sortie qui correspondent respectivement aux vecteurs $[I_1, \dots, I_{125}]$ et $[O_1, \dots, O_{125}]$.

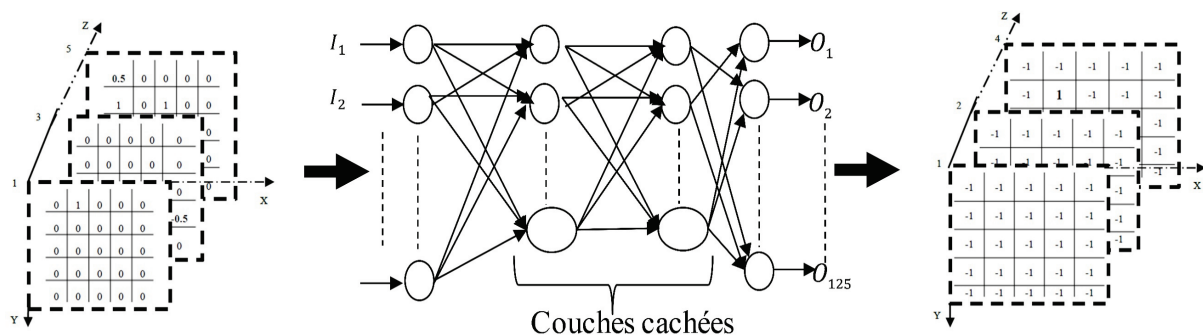


Figure 2-7 : Structure du réseau de neurones

Le nombre de neurones dans la couche de sortie est prédéterminé par la nature du problème, à savoir 125 neurones qui correspondent au nombre d'éléments dans la matrice discrétisée. Après la génération des points intermédiaires, ces derniers sont reliés par un polynôme quintique afin de produire le chemin à suivre au manipulateur.

2.2.3 Calcul de la trajectoire optimale

L'objectif est de déplacer l'extrémité du manipulateur d'une position initiale à une position finale, en respectant les contraintes et en évitant l'obstacle. Afin de respecter ces deux conditions, la génération de mouvements point à point semble plus adaptée pour l'évitement d'obstacle et le polynôme de degré cinq permet de respecter les contraintes en vitesses et en accélérations entre chaque point intermédiaire. En effet, le nombre de coefficients dépend du nombre de contraintes [52, 62]. Dans notre cas l'effecteur doit se déplacer entre deux positions en respectant les contraintes de position, de vitesse et d'accélération. Par conséquent, un polynôme de degré cinq est mieux adapté puisque six coefficients du polynôme peuvent satisfaire les six contraintes qui sont la position, la vitesse et l'accélération entre deux points.

Un polynôme de degré supérieur pourrait également être utilisé pour respecter ces contraintes. Cependant, dans chaque calcul de trajectoire, l'un des coefficients aura une valeur nulle. Des exemples de calcul de coefficient d'un polynôme d'ordre six sont présentés

dans le tableau 2-2. Dans ces simulations, les trajectoires sont générées à partir de différentes positions initiales et finales (axe des abscisses). On peut observer les coefficients nuls dans chaque simulation. Par conséquent, les trajectoires ne sont calculées que pour six coefficients, ce qui signifie qu'un polynôme d'ordres cinq est suffisant pour nos six coefficients. Cependant, la génération de mouvements dans l'espace opérationnel s'effectue en deux étapes : tout d'abord, on définit les coefficients du polynôme entre chaque point, puis on établit une loi d'évolution temporelle, cette dernière permet de caractériser le mouvement. Le polynôme quintique est défini à l'équation (2-1) et les conditions aux limites (configuration initiale et finale) sont présentées dans (2-2).

Tableau 2-2 : Résultats du calcul des coefficients pour la génération de trajectoires sur l'axe x

Simulations	1	2	3
a0	4.1186	5.0000	3.0000
a1	1.2500	1.1995	0.8615
a2	-0.1451	0.7464	4.1085
a3	-1.1555	-11.0854	-4.8006
a4	1.4983	14.0465	-0.7203
a5	0	0	0
a6	-0.3400	-4.0220	1.6567

Afin d'avoir une continuité de vitesse et d'accélération entre les points intermédiaires, les conditions suivantes sont imposées pour chaque transition entre deux points :

$$\begin{cases} \dot{u}_i(t_{if}) = \dot{u}_j(t_{j0}) \\ \ddot{u}_i(t_{if}) = \ddot{u}_j(t_{j0}) \end{cases}, \quad (2-3)$$

où i et j correspondent aux points intermédiaires, avec $\{i, j\} \in [1, n]$; n est le nombre maximum de points intermédiaires générés entre la position finale et initiale ; t_{if} et t_{j0} représentent respectivement le temps final au point i et le temps initial au point j (prochain point). Les conditions entre chaque deux points sont représentées ci-dessous :

$$\begin{cases} u_i = a_{0ij} + a_{1ij}t_i + a_{2ij}t_i^2 + a_{3ij}t_i^3 + a_{4ij}t_i^4 + a_{5ij}t_i^5 \\ u_j = a_{0ij} + a_{1ij}t_j + a_{2ij}t_j^2 + a_{3ij}t_j^3 + a_{4ij}t_j^4 + a_{5ij}t_j^5 \\ \dot{u}_i = a_{1ij} + 2a_{2ij}t_i + 3a_{3ij}t_i^2 + 4a_{4ij}t_i^3 + 5a_{5ij}t_i^4 \\ \dot{u}_j = a_{1ij} + 2a_{2ij}t_j + 3a_{3ij}t_j^2 + 4a_{4ij}t_j^3 + 5a_{5ij}t_j^4 \\ \ddot{u}_i = 2a_{2ij} + 6a_{3ij}t_i + 12a_{4ij}t_i^2 + 20a_{5ij}t_i^3 \\ \ddot{u}_j = 2a_{2ij} + 6a_{3ij}t_j + 12a_{4ij}t_j^2 + 20a_{5ij}t_j^3 \end{cases}, \quad (2-4)$$

Cependant, pour résoudre ce système d'équations, on le transforme sous forme matricielle:

$$\begin{pmatrix} 1 & t_i & t_i^2 & t_i^3 & t_i^4 & t_i^5 \\ 1 & t_j & t_j^2 & t_j^3 & t_j^4 & t_j^5 \\ 0 & 1 & 2t_i & 3t_i^2 & 4t_i^3 & 5t_i^4 \\ 0 & 1 & 2t_j & 3t_j^2 & 4t_j^3 & 5t_j^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_i & 12t_i^2 & 20t_i^3 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_j & 12t_j^2 & 20t_j^3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_{0ij} \\ a_{1ij} \\ a_{2ij} \\ a_{3ij} \\ a_{4ij} \\ a_{5ij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_i \\ u_j \\ \dot{u}_i \\ \dot{u}_j \\ \ddot{u}_i \\ \ddot{u}_j \end{pmatrix}, \quad (2-5)$$

où $[a_{0ij}, a_{1ij}, a_{2ij}, a_{3ij}, a_{4ij}, a_{5ij}]$ représentent les coefficients du polynôme qui seront calculés entre chaque deux points de la trajectoire. Après le calcul du polynôme, les coefficients sont optimisés entre chaque deux points en utilisant les moindres carrés pour réduire la longueur du chemin. Par conséquent, le modèle est représenté comme suit :

$$\begin{pmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & t_1^3 & t_1^4 & t_1^5 \\ 1 & t_2 & t_2^2 & t_2^3 & t_2^4 & t_2^5 \\ 1 & . & . & . & . & . \\ 1 & . & . & . & . & . \\ 1 & t_n & t_n^2 & t_n^3 & t_n^4 & t_n^5 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \hat{a}_{0ij} \\ \hat{a}_{1ij} \\ \hat{a}_{2ij} \\ \hat{a}_{3ij} \\ \hat{a}_{4ij} \\ \hat{a}_{5ij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ . \\ . \\ . \\ u_n \end{pmatrix}, \quad (2-6)$$

Avec :

$$\hat{\theta}_{ij} = (\mathbf{h}^T \mathbf{h})^{-1} \mathbf{h}^T \mathbf{Y}, \quad (2-7)$$

où $\hat{\theta}_{ij}$ est le vecteur des coefficients du polynôme $\hat{\theta}_{ij} = [\hat{a}_{0ij} \dots \hat{a}_{5ij}]$; \mathbf{Y} représente les points de la trajectoire calculés à partir du polynôme $\mathbf{Y} = [u_1 \dots u_n]$; \mathbf{h} est la matrice de temps et n correspond au nombre de points de la trajectoire. Afin de générer une trajectoire sécuritaire pendant l'interaction, un algorithme temps réels est proposé et présenté à la section suivante.

2.2.4 Algorithme de génération de trajectoires sécuritaires

L'algorithme illustré à la figure 2-9 se déroule comme suit : tout d'abord, la position initiale, finale et celle de l'obstacle sont récupérées à partir de la matrice discrétisée. Ensuite, la distance est évaluée à chaque point de la trajectoire en utilisant un algorithme d'estimation du temps d'arrivée de l'interférence tel que suggéré dans [80]. Ceci est déterminé en calculant la distance entre les membres supérieurs de l'avatar humain et les membres du manipulateur comme illustré à la figure 2-8. Si la distance est plus petite que la somme des rayons et qu'une distance de seuil, une collision se produit. La distance est analysée selon la fonction suivante:

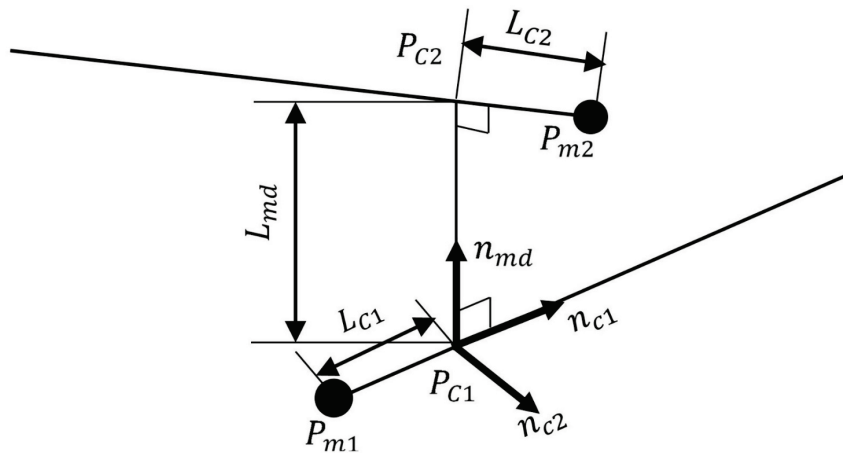


Figure 2-8 : Calcul de distance entre le segment humain et celui du manipulateur

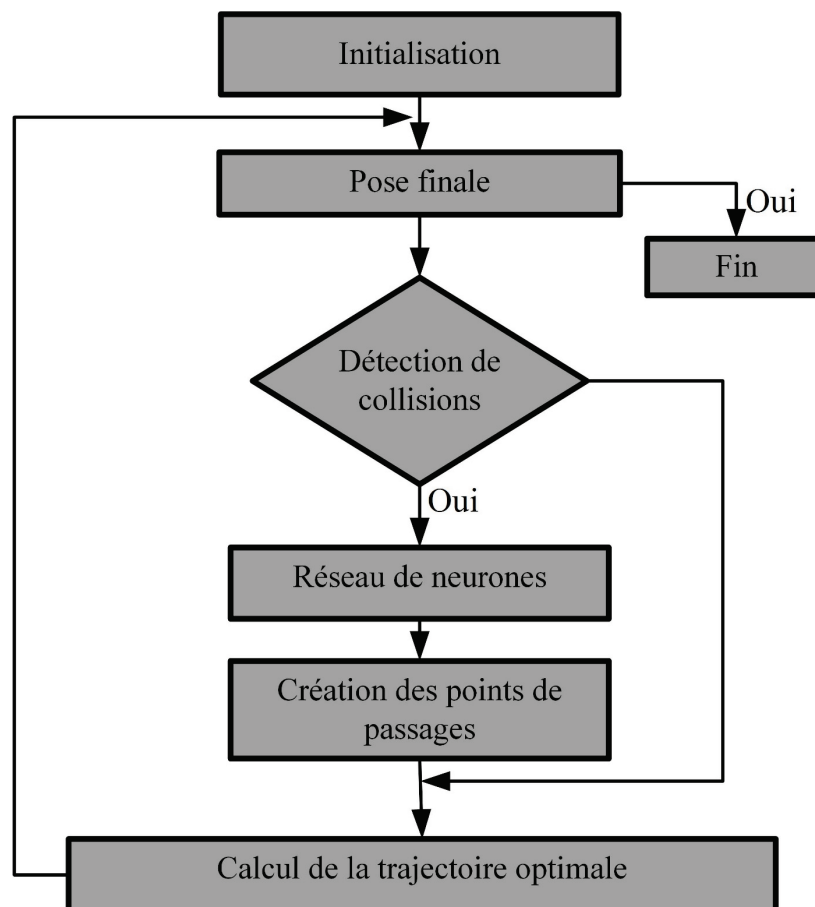


Figure 2-9 : Algorithme de génération de trajectoires dans l'environnement dynamique

$$\mathbf{n}_{md} = \mathbf{n}_{c2} \times \mathbf{n}_{c1} \quad (2-8)$$

$$L_{c1}\mathbf{n}_{c1} + L_{md}\mathbf{n}_{md} - L_{c2}\mathbf{n}_{c2} = \mathbf{P}_{m2} - \mathbf{P}_{m1},$$

où L_{c1} est la distance entre le point du poignet \mathbf{P}_{m1} et \mathbf{P}_{c1} l'intersection avec le vecteur perpendiculaire commun $L_{md}\mathbf{n}_{md}$. L_{c2} est la distance entre l'effecteur du manipulateur \mathbf{P}_{m2} et \mathbf{P}_{c2} l'intersection avec le vecteur perpendiculaire commun $L_{md}\mathbf{n}_{md}$. Dans ce cas, les points \mathbf{P}_{c1} et \mathbf{P}_{c2} représentent la position des capteurs situés sur le bras humain et l'effecteur du manipulateur.

Selon le résultat de cette fonction, l'algorithme propose deux cas, collision ou non-collision. Dans ce dernier cas, la trajectoire est calculée de la position initiale à finale. Dans la situation d'une collision, la prochaine étape consiste à déterminer des points intermédiaires à partir du réseau de neurones afin de générer une nouvelle trajectoire. Après la récupération des points de passage, ces derniers sont classifiés par ordre croissant par rapport à la position initiale. En effet, les distances sont calculées entre la position initiale et chaque point intermédiaire afin de respecter l'ordre de passage.

En d'autres termes, le premier point de passage correspond au point le plus proche de la position actuelle du manipulateur. Enfin, les coefficients ainsi que la trajectoire optimale sont calculés entre chaque deux points jusqu'à la position finale. Afin d'évaluer l'algorithme, des simulations sont proposées et discutées dans la section suivante.

2.3 Simulations de la génération de trajectoires

L'étude de cas considérée pour le partage des activités de production consiste à un processus d'assemblage en coopération appliqué dans une cellule hybride [75]. Cette dernière est discrétisée en cube de trois dimensions et des simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel MATLAB. Les résultats sont déterminés à partir de l'algorithme présenté à la figure 2-9 qui permet de générer les points de passage et de calculer la trajectoire en temps réel. Cependant, le procédé d'apprentissage et d'optimisation de la structure du réseau de neurones (nombre de couches et de cellules) est présenté en premier.

2.3.1 Détermination de la structure du réseau de neurones

Dans cette étape, 664 données d'entraînement (matrice d'entrées et de sorties) ont été utilisées pour l'apprentissage du réseau de neurones. Ces données correspondent aux différentes configurations de l'opérateur et aux positions du manipulateur pendant le processus d'assemblage. Une fois la base de données définie, elles sont rassemblées en deux vecteurs et présentées au réseau de neurones pour l'apprentissage. Pendant cette phase, les valeurs des poids sont ajustées et affinées continuellement en utilisant l'algorithme d'optimisation Levenberg-Marquardt. Les performances du réseau sont ensuite vérifiées après l'arrêt de l'apprentissage. Si le réseau arrive à prédire correctement les points intermédiaires qui favorisent l'évitement d'obstacle, on peut dire que le réseau est

opérationnel. Dans le cas contraire, il faut réviser le nombre de neurones et de couches. Après plusieurs simulations de différentes structures, les résultats montrent que la performance de chaque structure testée varie en fonction du nombre de couches cachées et de neurones. Le tableau 2-3 illustre trois combinaisons enregistrées. On constate que la meilleure performance est $R = 0.96$ et $MSE = 0.0025$ correspondante à deux couches cachées de 150 cellules dans la première et de 70 cellules dans la seconde, et avec une fonction d'activation sigmoïde.

Tableau 2-3 : Évaluation des structures du réseau de neurones

Structures	200	150-50	150-70
R value	0.9405	0.94	0.96
MSE	0.0038	0.0034	0.0025

Cependant, le résultat de la structure correspond seulement à la taille de la grille 3D. Si la taille de la grille change, une nouvelle évaluation de la structure du réseau est à considérer.

2.3.2 Résultats des simulations

Plusieurs simulations statiques et dynamiques ont été effectuées afin de valider l'approche de génération de trajectoires sécuritaires. Cette section présente quelques résultats

obtenus de l'algorithme présenté à la figure 2-9, mis en œuvre sur MATLAB. Les résultats des trajectoires opérationnelles ainsi que la vitesse 3D et l'accélération 3D des simulations sont présentés ci-dessous. Dans chaque simulation, l'avatar est représenté selon les positions détectées de deux poignets et d'une tête comme illustré aux figure 2-5 et figure 2-6. Les points de passage sont représentés par le signe (+) couleur rouge alors que rond (o) et carré (\square) sont respectivement les positions initiale et finale. Selon la norme ISO 10218-1 [43], la vitesse maximale est fixée à 250 mm/s pour les travaux coopératifs. Le temps entre les positions initiales et finales est donné par la distance parcourue et l'accélération articulaire maximale du manipulateur (couple du moteur). Pour notre configuration, le temps de parcours est calculé par une équation de base qui correspond à la distance parcourue divisée par la vitesse. Ensuite, l'accélération maximale est calculée en multipliant la vitesse maximale par le temps. Cependant, dans nos simulations, nous considérons une grille 3D où un carré ($5 \times 5 \times 5$) correspond à ($500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$). Les conditions dans chaque point intermédiaire généré sont définies par la vitesse et l'accélération maximale afin d'avoir un fonctionnement optimal du manipulateur.

2.3.2.1 Simulations où l'humain est dans une posture statique

Dans cette section, trois configurations sont proposées. La vitesse 3D et l'accélération 3D de chaque configuration sont également illustrées. La figure 2-10 présente une configuration avec une position de départ qui correspond à 100 mm (*millimètres*) en x et y , 500 mm en z . La position finale est de 500 mm en x , de 400 mm en y et de 300 mm en z .

L'algorithme a généré un point de passage en position 500 mm en x , 300 mm en axes y et z afin d'éviter la collision. La figure 2-11 illustre une deuxième configuration avec la même position initiale que la première configuration et une position finale qui correspond à 500 mm en x , 400 mm en axe y et z . Cependant, deux points de passages sont créés pour éviter les collisions. La figure 2-12 et la figure 2-13 présentent respectivement les graphiques des vitesses et d'accéléérations des deux configurations. On constate que les courbes sont continues dans le temps.

Dans chaque simulation, l'algorithme génère les points nécessaires pour éviter les collisions. Cependant, dans certains cas la trajectoire générée n'atteint pas le point intermédiaire si l'obstacle n'est plus détecté sur le chemin, comme illustré à la figure 2-14.

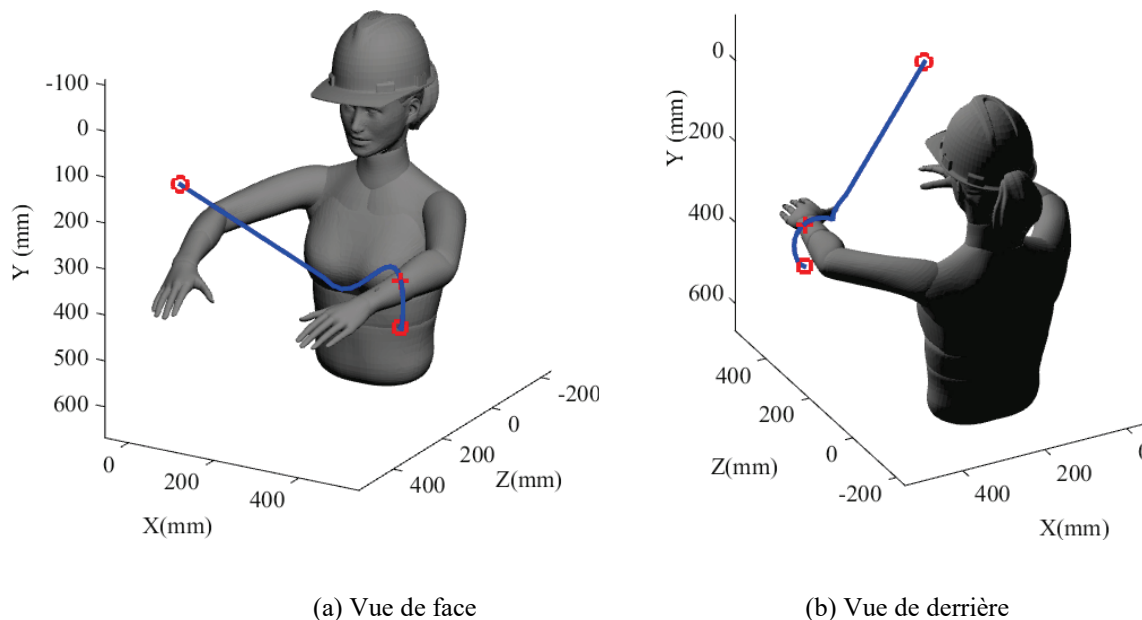
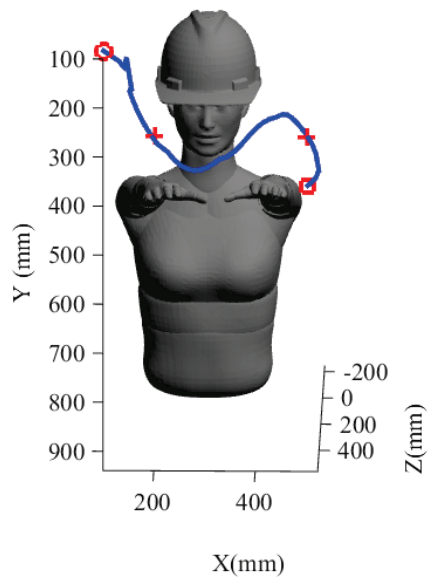
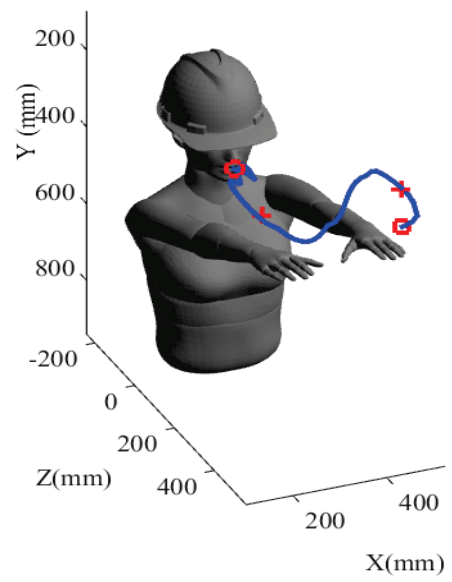


Figure 2-10 : Trajectoire 3D avec un point intermédiaire

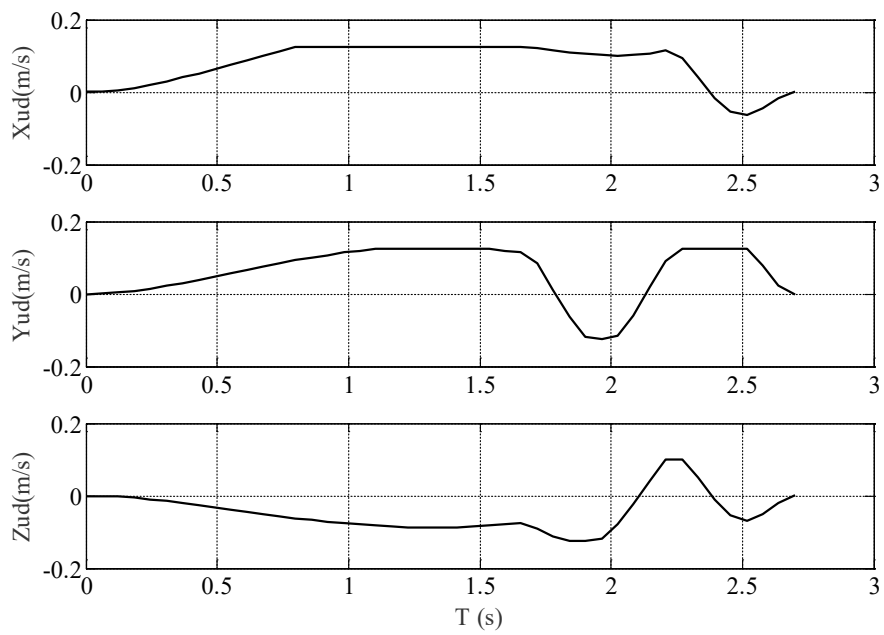


(a) Vue de face

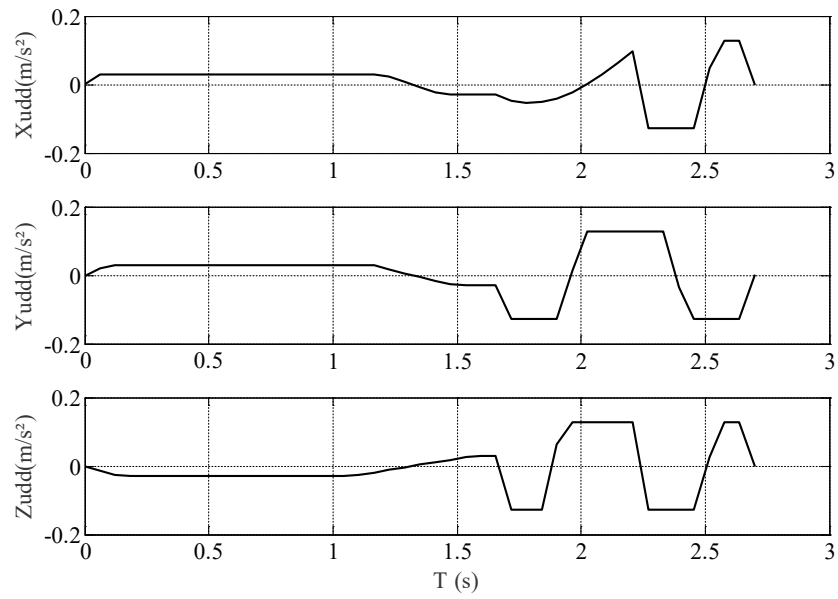


(b) Vue de côté

Figure 2-11 : Trajectoire 3D avec deux points intermédiaires

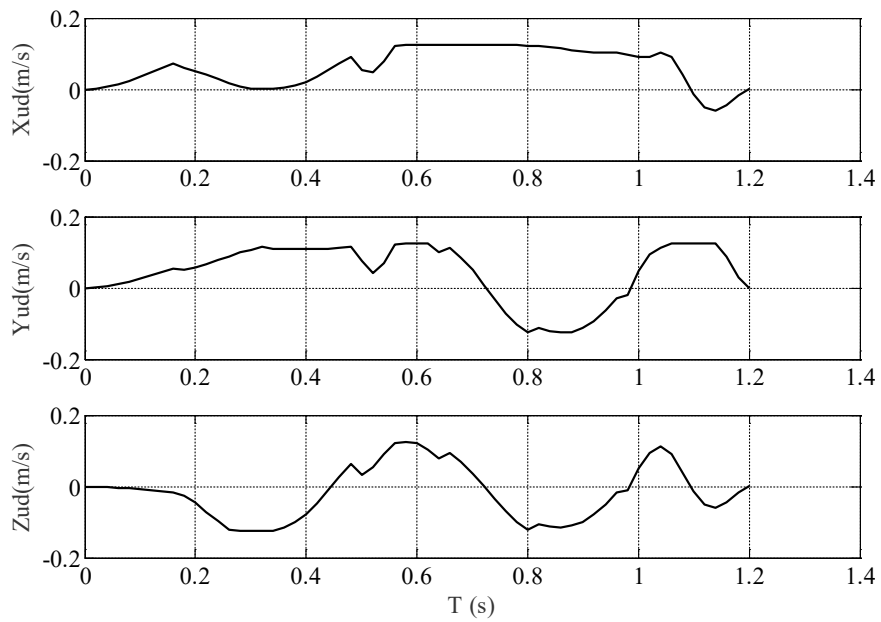


(a) Vitesse

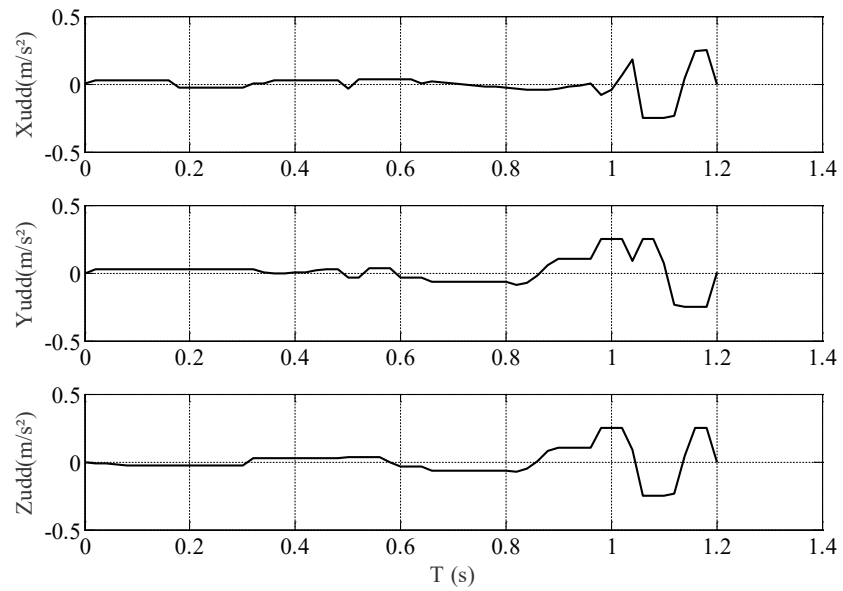


(b) Accélération

Figure 2-12 : Graphes des vitesses et accélération de la première simulation

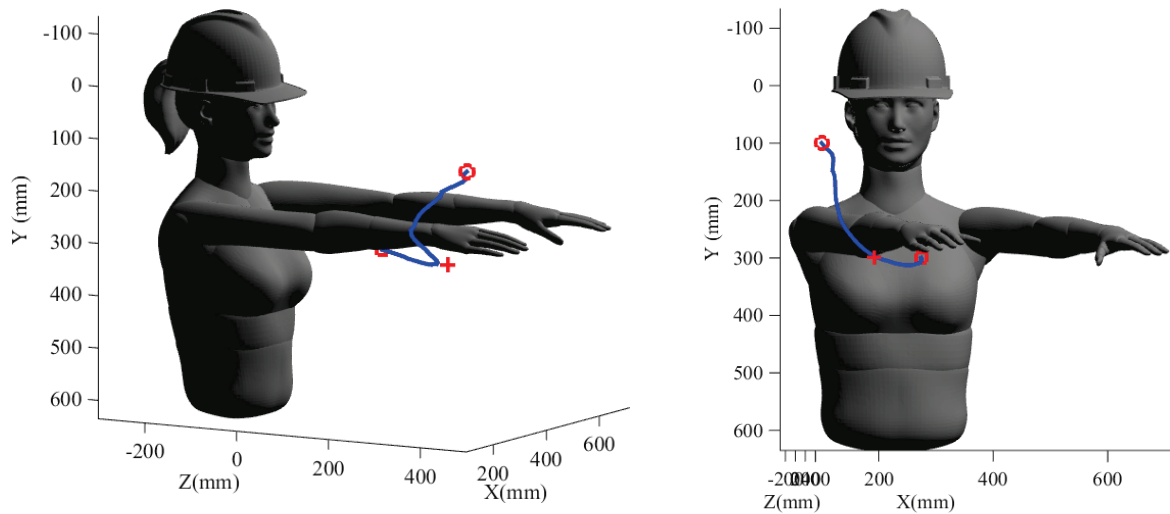


(a) Vitesse



(b) Accélération

Figure 2-13 : Graphes des vitesses et accélération de la deuxième simulation



(a) Vue de coté

(b) Vue de face

Figure 2-14 : Trajectoire 3D sans franchissement du point intermédiaire

En effet, après chaque déplacement la distance minimale entre les membres humains et les membres du manipulateur est calculée en utilisant la fonction de détection des collisions. Si cette distance est respectée pendant le déplacement, une nouvelle trajectoire est calculée à partir du point actuel jusqu'à la position finale.

2.3.2.2 Simulations avec des mouvements de l'humain

Une simulation dynamique avec obstacle en mouvement est illustrée à la figure 2-15. Cette dernière montre le résultat de la simulation comprenant trois configurations avec une adaptation en ligne de la trajectoire. Le résultat est présenté en neuf images instantanées où ces dernières proviennent d'une vidéo :

- Dans la première configuration, la trajectoire est calculée de la position initiale à la position finale, et elle est illustrée à l'image (a).
- Ensuite, un déplacement inattendu du bras humain est montré à la deuxième image. Dans l'image (c), un point intermédiaire a été généré afin d'éviter la collision avec le bras gauche de l'opérateur.
- La correction en temps réel de la trajectoire est appliquée et illustrée en (d). En outre, la continuité de l'ancien chemin est également présentée dans cette image.
- L'opérateur se déplace à nouveau et la forme géométrique de l'humain a changé (e).

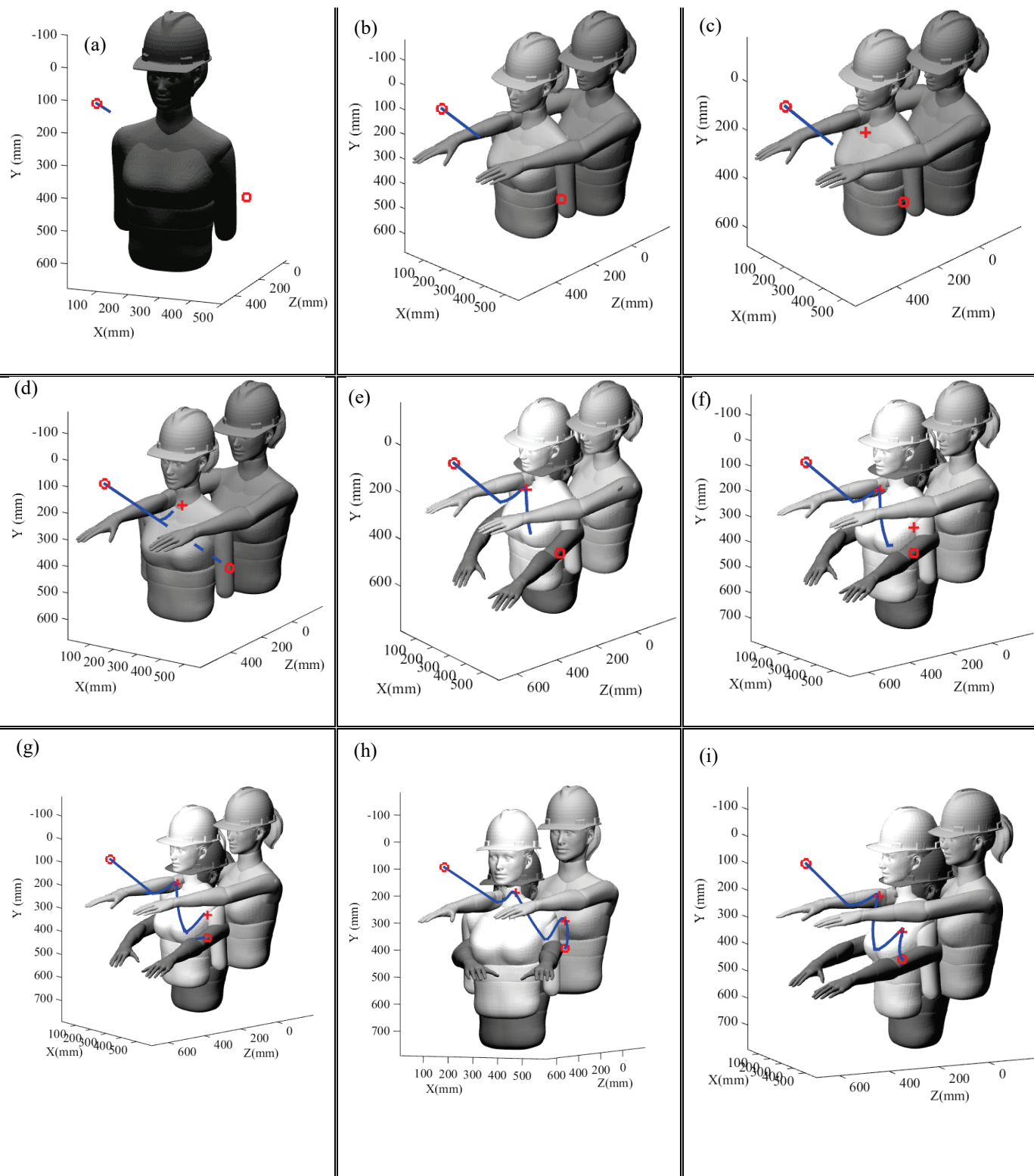


Figure 2-15 : Simulation dynamique avec correction de la trajectoire

Par conséquent, la méthode aboutit à une nouvelle trajectoire d'évitement d'obstacles en définissant un autre point de passage lorsque la distance minimale n'est plus respectée (image f).

- La continuité de l'ancien chemin est aussi présentée dans (g).
- Les images (h) et (i) illustrent la simulation finale avec des vues différentes.

La méthode proposée permet d'éviter les collisions lors du partage des activités de production comme la tâche d'assemblage en coopération. Le seul inconvénient de la stratégie est la collecte de données pour l'apprentissage qui peut consommer un certain temps par rapport à l'application industrielle. Cependant, l'apprentissage est effectué à l'installation du manipulateur et de la cellule de travail ou lorsque la tâche est modifiée.

2.4 Discussion et conclusion

Ce chapitre étudie le premier type d'interaction discuté dans ce projet de recherche, à savoir le partage des activités. La revue de littérature a permis d'établir des éléments importants à prendre en considération afin d'assurer la sécurité de l'opérateur pendant l'interaction. Par ce fait, la méthode propose de générer des trajectoires sécuritaires en tenant compte de ces éléments. Ces derniers sont la géométrie déformable de l'obstacle, l'environnement dynamique ainsi que les contraintes cinématiques et géométriques du manipulateur. La stratégie consiste à créer des points de passage pour contourner l'obstacle en utilisant un réseau de neurones (Back-propagation). Ces points, ainsi que les positions

initiale et finale sont reliés par un polynôme quintique (de degré cinq). En outre, une optimisation de trajectoire est appliquée afin de réduire la longueur du chemin.

Par ailleurs, la méthode est validée en simulant un espace hybride où l'opérateur coopère avec le manipulateur dans une tâche d'assemblage. Trois points de mesures sont suffisants pour l'évitement des collisions puisque l'opérateur collabore autour d'une table d'assemblage comme illustré à la figure 2-5. En effet, les mouvements dynamiques principaux sont les membres supérieurs (les mains). Par conséquent, deux points de mesures récupérées à l'aide de deux capteurs situés sur ces deux membres permettent de nous renseigner sur la position. Le troisième point de mesure nous renseigne sur la position de la tête puisqu'une collision à ce point pourrait provoquer de graves blessures. D'autres points de mesures pourraient être ajoutés selon l'application. Cependant, un nouveau codage ainsi qu'une nouvelle évaluation de la structure du réseau de neurones sont nécessaires puisque de nouveaux paramètres sont ajoutés.

Une limitation a été remarquée au niveau du calcul de distance présenté à la section 2.2.4. En effet, dans certains cas la solution donnée par l'équation (2-8) ne correspond pas aux contraintes physiques telles que les longueurs du bras humain ainsi que du manipulateur. Par conséquent, l'algorithme ne converge pas puisque la solution est à l'extérieur des dimensions physiques, elle est donc abandonnée. Une autre méthode tenant compte des contraintes physiques est proposée au chapitre suivant à la section 3.3. Cette dernière constitue une amélioration et permet de déterminer la distance à chaque instant.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION MATHÉMATIQUE ET CALCUL DE DISTANCE MINIMALE ENTRE LES CÂBLES

Après une introduction au premier chapitre des différents types de manipulateurs, ce projet de recherche propose principalement des approches et des algorithmes appliqués à des MPEC. Cette partie présente de manière théorique la modélisation géométrique et cinématique d'un mécanisme parallèle entraîné par sept câbles. Ce dernier a été utilisé pour la validation des différentes approches proposées dans les chapitres suivants. En outre, les résultats de la méthode utilisée précédemment dans le calcul de distance, ont permis d'amener une nouvelle problématique à laquelle une solution est apportée dans ce chapitre. Ainsi, une nouvelle méthode est abordée en prenant en considération les contraintes physiques. Par ailleurs, un algorithme permettant de calculer cette distance en temps réel est proposé, ainsi que des expérimentations sur le MPEC.

3.1 Introduction

L'un des inconvénients des mécanismes entraînés par des câbles réside dans l'interférence entre les câbles pendant le déplacement de la plateforme mobile. Toutefois, pour détecter les interférences pendant les déplacements, il est nécessaire de déterminer la distance à chaque instant entre les câbles. Plusieurs formulations mathématiques sont décrites pour déterminer géométriquement la distance entre chaque paire de câbles [81]. Parmi ces méthodes, on distingue la formulation basée sur le calcul de distance entre deux droites qui consiste à calculer la perpendiculaire commune aux deux droites comme présentée à la section 2.2.4. Cette méthode a été appliquée pour déterminer la distance entre les segments rigides des robots parallèles [82, 83], ainsi que la distance entre les câbles [84] lorsque ces derniers sont considérés comme des lignes droites, par exemple les auteurs dans [80] proposent cette approche. Toutefois, les dimensions physiques ne sont pas prises en compte dans la méthode. En effet, les câbles peuvent se croiser à l'infini puisqu'ils sont considérés comme des droites au niveau de la modélisation.

Afin d'éviter l'intersection en dehors des longueurs réelles des câbles, Perreault et al. [85] introduisent des variables adimensionnelles. Ces dernières agissent sur la longueur des câbles où la valeur maximum de ces variables correspond à la longueur maximum des câbles. Le mécanisme étudié est conçu avec une géométrie équipée de sept câbles reliant des enrouleurs servo- actionnés et à une plateforme mobile tel qu'illustré à la figure 3-1. Chaque

câble est attaché à un point différent sur la plateforme mobile, ce qui permet de contrôler complètement la position et la rotation dans l'espace.

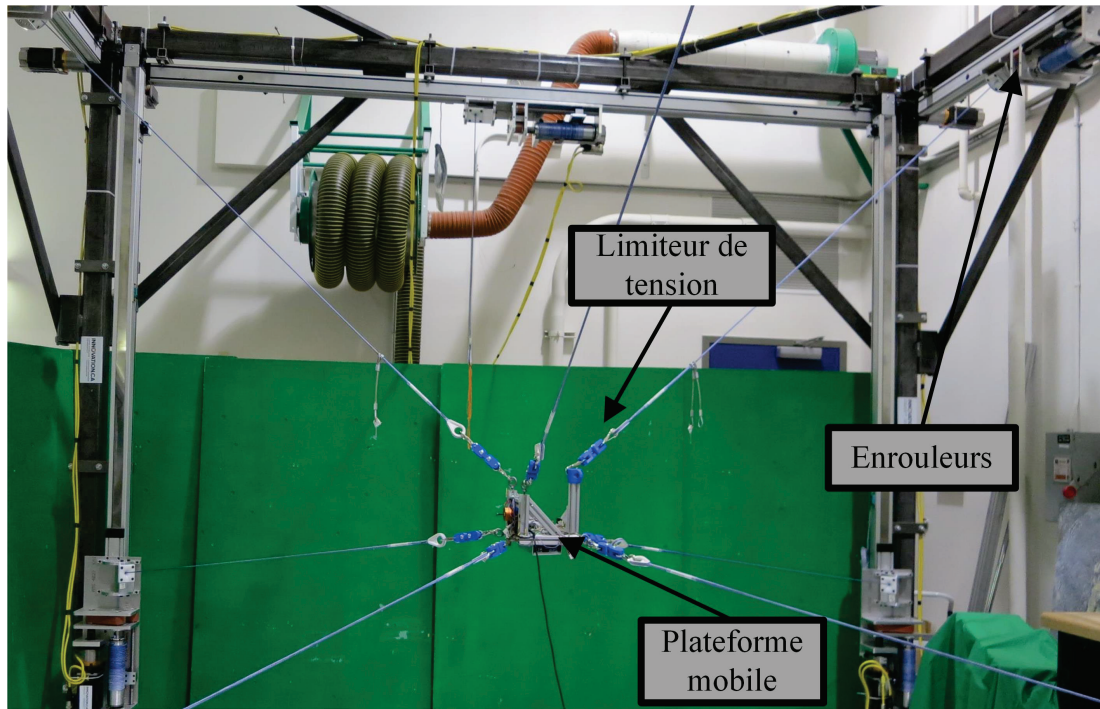


Figure 3-1 : Image réelle du mécanisme entraîné par sept câbles

La figure 3-2 présente un dessin en trois dimensions de la structure au complet du MPEC. Deux hypothèses sont émises tout au long de cette étude. La première considère que la masse des câbles est négligeable et la deuxième admet que les câbles sont en tension et sont comme des droites dans l'analyse géométrique et cinématique. Bien que ces hypothèses permettent de faciliter les calculs, l'affaissement des câbles pourrait se produire lors des déplacements du MPEC dans ce grand de travail.

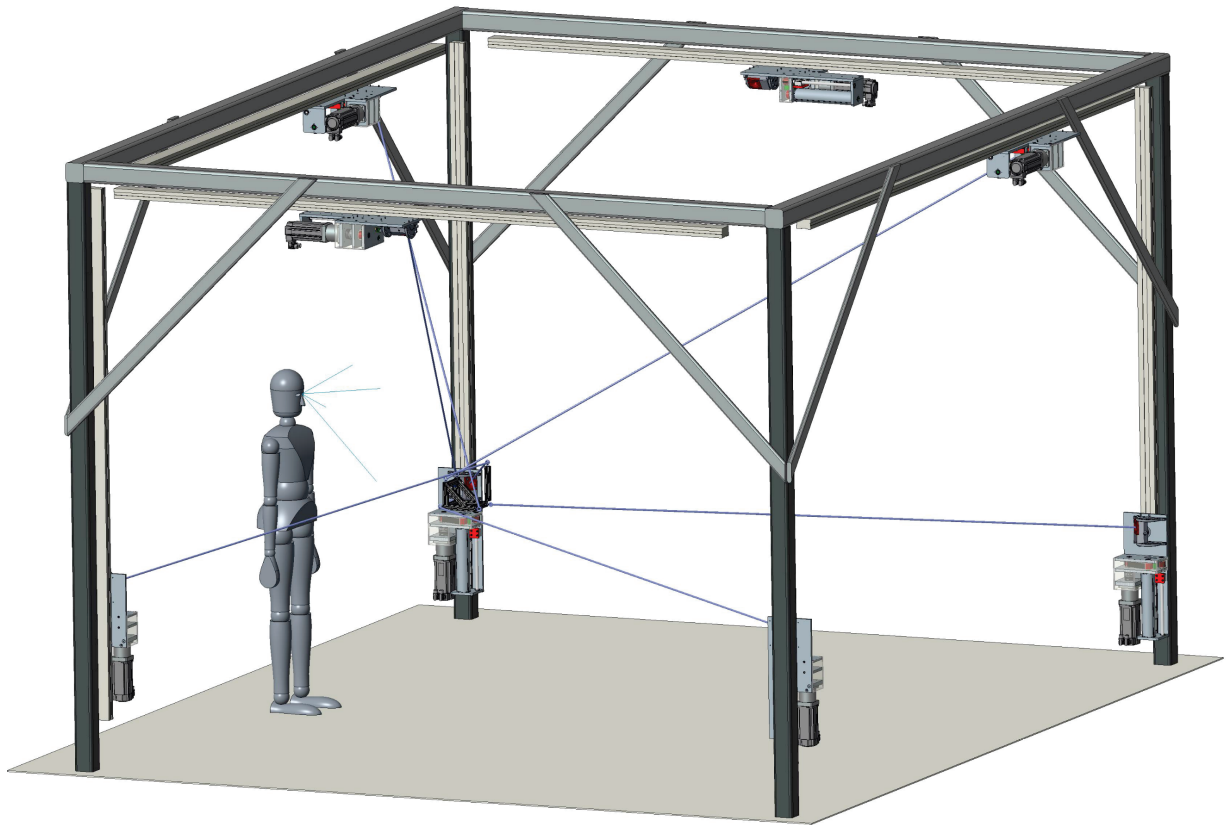


Figure 3-2 : Dessin 3D du mécanisme à 7 câbles (Jean-François Parent, ULaval 2017)

En effet, l'affaissement du câble augmente proportionnellement par rapport au poids et à la longueur du câble surtout si l'épaisseur est importante. Par conséquent, une tension nulle dans ce type de cas provoque un affaissement croissant vers l'infini [86]. Toutefois, le calcul pourrait devenir un peu plus complexe lorsque l'affaissement des câbles est considéré [87] dans la modélisation. Afin de contrôler la plateforme mobile, il faut tout d'abord déterminer les équations géométriques et cinématiques, pour ensuite définir le schéma de commande.

3.2 Modèles géométrique et cinématique du mécanisme

Les modèles géométriques direct et inverse permettent d'exprimer un lien entre les coordonnées cartésiennes, qui renseignent sur la situation de la plateforme mobile, avec les coordonnées articulaires. Dans les mécanismes parallèles entraînés par des câbles, le PGI (*problème géométrique inverse*) consiste à déterminer la longueur des câbles en fonction de la pose (position et rotation) de la plateforme mobile. Le PGD (*problème géométrique direct*) admet le passage inverse, à savoir le calcul de la position de plateforme par rapport aux longueurs des câbles. Ce dernier est parfois difficile à résoudre suite aux équations non linéaires du système.

La structure du mécanisme est illustrée à la figure 3-3. Les sept enrouleurs sont nommés et numérotés de A_1 à A_7 . Les repères A et B correspondent respectivement au repère de base de la structure et au centre de masse de la plateforme mobile. La figure 3-4 définit les paramètres de la structure décomposée par des vecteurs. Afin de faciliter l'écriture, les vecteurs et les matrices sont représentés en gras. Les paramètres utilisés sont définis comme suit :

$$\mathbf{p}_i = \|\overrightarrow{B_i A_i}\|, \mathbf{a}_i = \|\overrightarrow{A_i A_i}\|, \mathbf{p} = \|\overrightarrow{AB}\|, \mathbf{b}_i = \|\overrightarrow{BB_i}\|,$$

Avec i qui représente le nombre de câbles $i = 1$ à 7. Le PGI est obtenu suivant la chaîne cinématique fermée où l'équation vectorielle pour chaque câble est définie comme suit :

$$\|\mathbf{p}_i\| = \|\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i\|, \quad (3-1)$$

avec : \mathbf{p}_i est un vecteur représentant les câbles; \mathbf{a}_i et \mathbf{b}_i sont respectivement les vecteurs de position de la base A_i et de la plateforme mobile B_i . La matrice de rotation entre le repère A et B est identifiée par \mathbf{Q} . Elle représente la rotation entre la plateforme mobile et le repère de base en utilisant la convention ZXY .

Le modèle géométrique inverse est défini comme suit :

$$\mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_i = \mathbf{p}_i^2 = [\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i]^T [\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i], \quad (3-2)$$

Le résultat final du PGI pour chaque actionneur est :

$$\mathbf{p}_i^2 = \mathbf{p}^T \mathbf{p} + (\mathbf{Q}\mathbf{b}_i)^T \mathbf{Q}\mathbf{b}_i + \mathbf{a}_i^T \mathbf{a}_i + 2\mathbf{p}^T \mathbf{Q}\mathbf{b}_i - 2\mathbf{p}^T \mathbf{a}_i - 2\mathbf{a}_i^T \mathbf{Q}\mathbf{b}_i, \quad (3-3)$$

Le modèle cinématique du mécanisme (jacobienne) est proposé afin d'établir un lien entre les vitesses cartésiennes de la plateforme mobile et les vitesses articulaires.

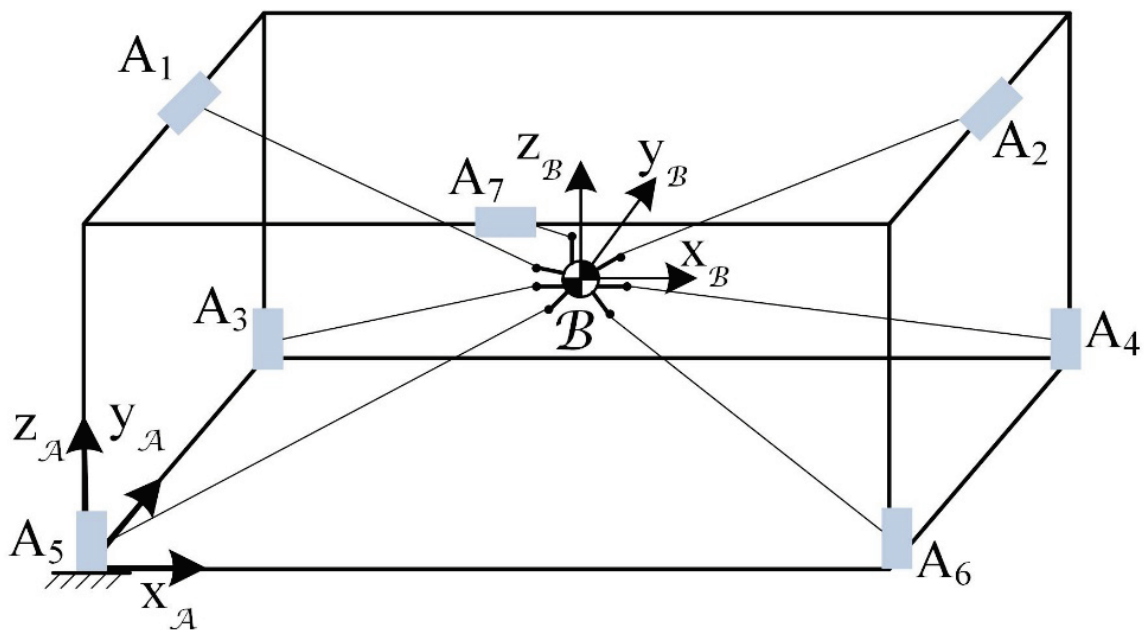


Figure 3-3 : Illustration du mécanisme avec les différentes composantes et repères

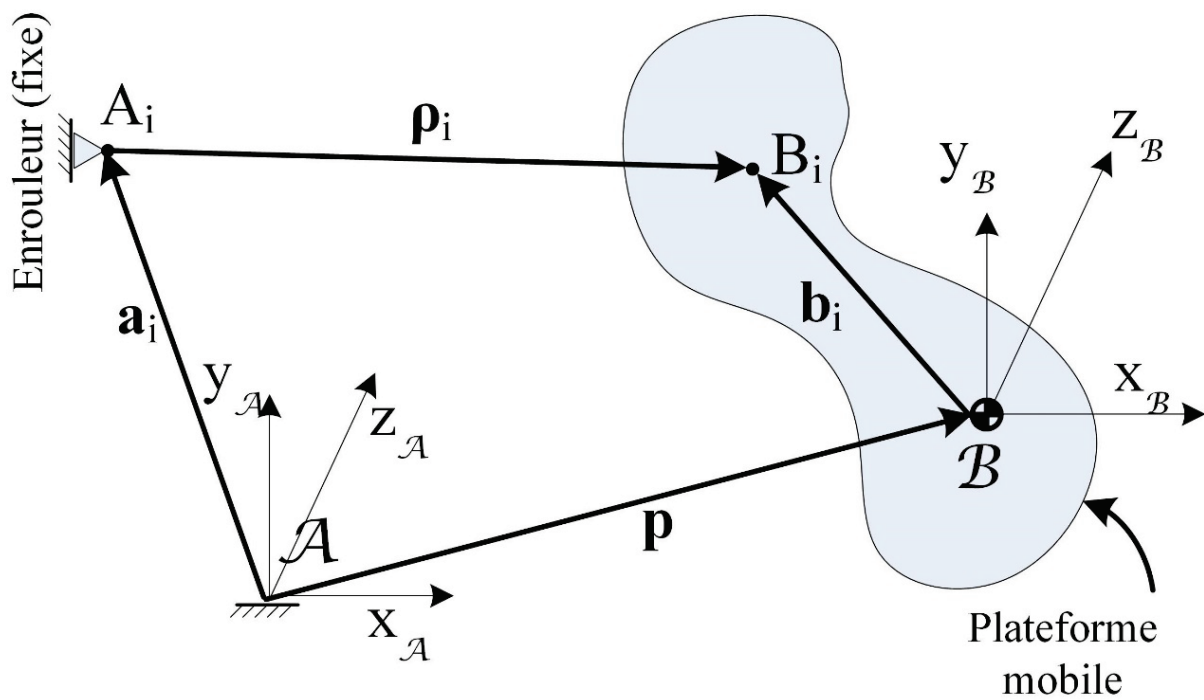


Figure 3-4 : Analyse géométrique du MPEC pour un câble

Afin de trouver le modèle cinématique, il suffit de dériver en fonction du temps l'équation (3-3). En factorisant $\dot{\mathbf{p}}$ et $\dot{\mathbf{Q}}$, l'équation devient :

$$\dot{\rho}_i = \frac{[\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i]^T}{\rho_i} \dot{\mathbf{p}} + \frac{[\mathbf{p} - \mathbf{a}_i]^T}{\rho_i} \dot{\mathbf{Q}}\mathbf{b}_i, \quad (3-4)$$

avec $\dot{\rho}_i$ est le taux de variation de la longueur des câbles. La dérivée de la matrice de rotation est représentée comme suit :

$$\dot{\mathbf{Q}} = \boldsymbol{\Omega}\mathbf{Q}, \quad (3-5)$$

et :

$$\boldsymbol{\omega} = \text{vec}(\boldsymbol{\Omega})$$

où $\boldsymbol{\Omega} = \begin{pmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{pmatrix}$, est la matrice antisymétrique définie par les composantes des

vecteurs de vitesses angulaires. Toutefois, dans notre cas, la matrice antisymétrique n'est pas représentée dans les équations puisque le choix est porté sur une formulation vectorielle. Par conséquent, l'équation (3-4) est appliquée pour les sept articulations et le résultat est représenté sous forme matricielle comme suit :

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{x}}, \quad (3-6)$$

$$\text{avec : } \mathbf{J}_{7 \times 6} = \begin{bmatrix} \frac{[\mathbf{p} + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i]^T}{\rho_i} & \frac{[\mathbf{Q}\mathbf{b}_i \times (\mathbf{p} - \mathbf{a}_i)]^T}{\rho_i} \end{bmatrix}.$$

Les colonnes de la matrice \mathbf{J} correspondent aux coordonnées cartésiennes (X, Y, Z) des vitesses linéaires et angulaires. Les lignes de cette matrice représentent l'équation cinématique pour chaque câble. $\dot{\mathbf{q}}_{7 \times 1} = [\dot{\rho}_1 \dots \dot{\rho}_7]^T$ est le vecteur des vitesses articulaires et $\dot{\mathbf{x}}_{6 \times 1} = [\dot{\mathbf{p}} \quad \dot{\boldsymbol{\omega}}]^T = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z} \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T$ le vecteur des vitesses linéaires et angulaires de la plateforme mobile. Par ailleurs, le symbole (\times) représente le produit vectoriel. L'analyse mathématique du mécanisme entraîné par sept câbles a permis de définir les modèles géométrique et cinématique du MPEC utilisés dans notre étude. L'inertie occasionnée par le mécanisme est négligeable puisque la masse de la plateforme mobile ainsi que les accélérations produites sont minimales. Par conséquent, le modèle dynamique n'est pas considéré dans l'étude.

3.3 Calcul de la distance minimale entre les câbles

À la suite des résultats annoncés au chapitre précédent sur le calcul de distance et aux limitations constatées, cette section introduit une nouvelle méthode de calcul considérant ces

limitations. Toutefois, avant de déterminer la distance entre deux câbles, il convient d'abord de définir géométriquement le point d'interférence et l'équation vectorielle de la distance, par la suite, cette équation est résolue analytiquement. Cette section présente ces deux étapes.

3.3.1 Détermination géométrique de la distance minimale

La figure 3-5 illustre la collision des deux câbles sur le plan, avec \mathbf{p}_{ij} le produit vectoriel entre \mathbf{p}_i et \mathbf{p}_j ($\mathbf{p}_{ij} = \mathbf{p}_i \times \mathbf{p}_j$). Cependant, l'interférence entre deux câbles peut uniquement se produire si les câbles \mathbf{p}_i et \mathbf{p}_j sont coplanaires. Par conséquent, une condition doit être ajoutée afin d'éviter une intersection en dehors des longueurs des câbles \mathbf{p}_i et \mathbf{p}_j . En effet, les câbles peuvent se croiser à l'infini quand \mathbf{p}_i et \mathbf{p}_j sont parallèles puisque géométriquement ils sont considérés comme des droites. Afin d'éviter cette situation, deux variables adimensionnelles d_i et d_j , comme proposé dans [85], sont introduites où $\mathbf{CB}_i = d_i \mathbf{p}_i$ et $\mathbf{CB}_j = d_j \mathbf{p}_j$. Ces conditions sont appliquées et illustrées à la figure 3-6 où \mathbf{d}_{ij} est le vecteur de distance entre les deux câbles.

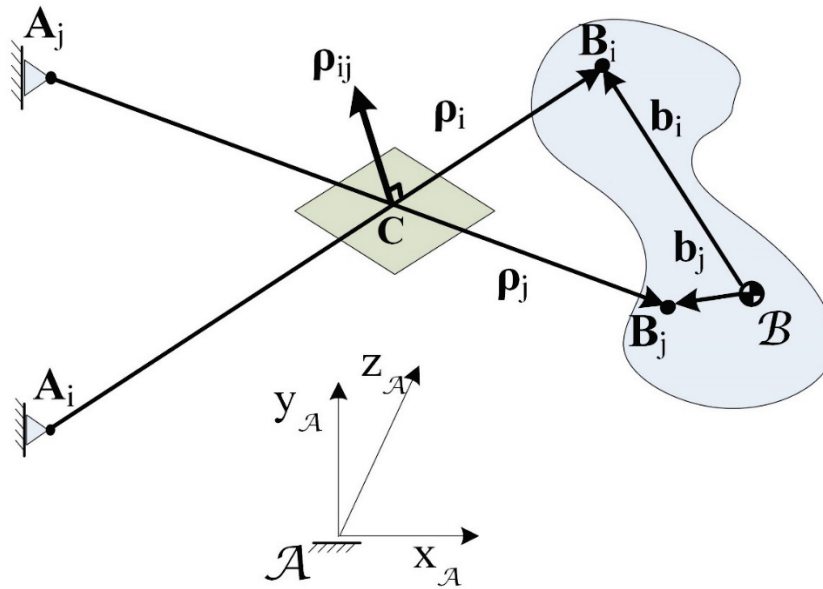


Figure 3-5 : Visualisation du plan d'interférence entre deux câbles

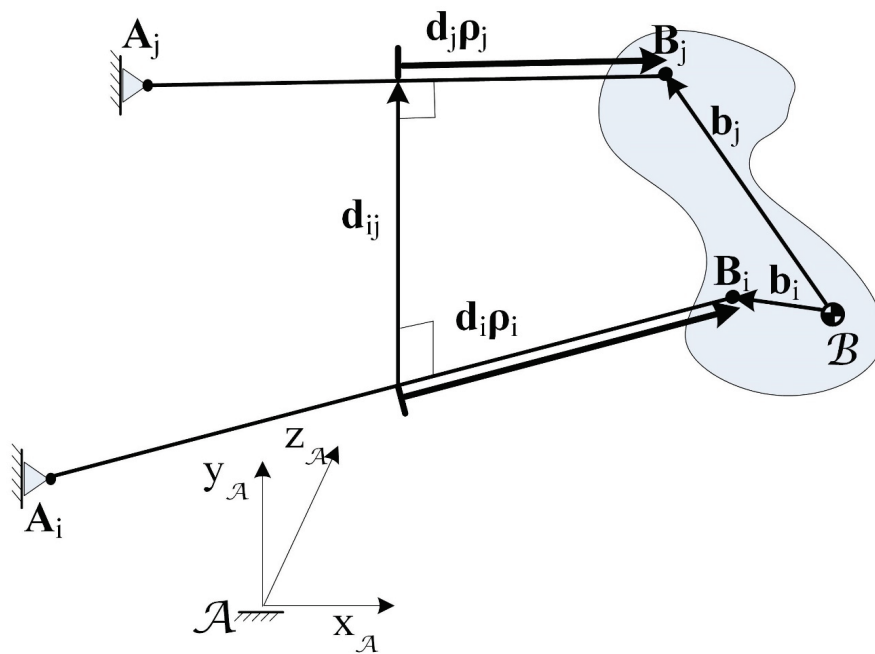


Figure 3-6 : Formulation vectorielle de la distance entre deux câbles

L'équation en boucle fermée entre deux câbles est définie comme suit :

$$\mathbf{d}_{ij} = d_i \mathbf{p}_i - d_j \mathbf{p}_j - \mathbf{Qb}_i + \mathbf{Qb}_j, \quad (3-7)$$

Cependant, les conditions suivantes sont appliquées sur les deux segments:

$$0 \leq d_i \leq 1 \text{ et } 0 \leq d_j \leq 1. \quad (3-8)$$

Lorsque d_i et d_j admettent la valeur limite supérieure (égale à 1), les longueurs maximales des câbles i et j sont considérées dans cette situation. En d'autres termes, la distance entre ces deux câbles correspond à la distance entre les deux enrouleurs. Par contre, si d_i et d_j admettent la valeur limite inférieure (égale à 0), la distance minimale est celle des deux points d'attaches de la plateforme mobile. Par conséquent, la distance \mathbf{d}_{ij} est déterminée dans un plan borné. Une fois les équations géométriques formulées, la prochaine étape consiste à calculer la distance minimale à partir de ces équations.

3.3.2 Détermination analytique de la distance minimale

L'objectif est de déterminer la distance minimale entre chaque paire de câbles à partir de l'équation définie précédemment et en respectant les contraintes formulées. Par

conséquent, la solution au problème du calcul de la distance minimale peut être formulée en un problème d'optimisation avec des contraintes d'inégalités. Il revient donc à minimiser l'équation (3-7) et à trouver une solution optimale qui satisfait les contraintes introduites dans l'équation (3-8). Ce dernier peut être résolu en utilisant les méthodes de programmation non linéaires comme les conditions Karush-Kuhn-Tucker (KKT). Cette méthode est largement utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation non linéaires [88, 89] avec des contraintes d'inégalités. L'idée est d'introduire des multiplicateurs afin d'augmenter les contraintes dans la fonction objective principale et ainsi rechercher le minimum local de la fonction avec une approche analytique. Ces multiplicateurs permettent de résoudre le problème d'optimisation soumis à des contraintes d'égalités et d'inégalités. La forme générale est la suivante :

$$\begin{aligned} & \min f(x) \\ & \text{Sous les contraintes : } \begin{cases} g(x) = 0 \\ h(x) \leq 0 \end{cases}, \end{aligned} \tag{3-9}$$

où $x \in \mathbb{R}^m$ est la variable à optimiser et $f : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ la fonction objective. Les contraintes d'égalités sont représentées par la fonction $g(x) : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ et les contraintes d'inégalités par $h(x) : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^l$. Le théorème de Karush-Kuhn-Tucker [90] est rapporté ci-dessous :

« Supposons qu'un point x_0 soit un extremum du problème d'optimisation soumis à des contraintes d'égalités et d'inégalités, et si x_0 est un point des contraintes, alors il existe un

scalaire μ_j , $j = 1, 2, \dots, n$ et un scalaire non négatif $\lambda_i \geq 0$, $i = 1, 2, \dots, l$. L'équation générale pour un problème d'optimisation est représentée comme suit :

$$L(x) = f(x) + \mu^T g(x) + \lambda^T h(x), \quad (3-10)$$

Dans laquelle : $\lambda^T h(x_0) = 0$,

avec :

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_l \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^l, \quad \mu = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \vdots \\ \mu_n \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^n. \quad (3-11)$$

Les scalaires μ_j et λ_i sont communément appelés les multiplicateurs de Karush-Kuhn-Tucker »

Puisque les conditions dans notre cas correspondent uniquement à des contraintes d'inégalités, le problème est formulé comme suit :

$$\min \|d_{ij}\|_2, \quad (3-12)$$

Sous les quatre contraintes suivantes :

$$-d_i \leq 0, d_i - 1 \leq 0, -d_j \leq 0 \text{ et } d_j - 1 \leq 0.$$

En remplaçant l'équation (3-7) dans (3-12) on obtient :

$$\begin{aligned} \min \quad & \|d_{ij}\| = f(d_i, d_j) \\ & = \left(d_i \mathbf{p}_i - d_j \mathbf{p}_j - \mathbf{Q} \mathbf{b}_i + \mathbf{Q} \mathbf{b}_j \right)^T \left(d_i \mathbf{p}_i - d_j \mathbf{p}_j - \mathbf{Q} \mathbf{b}_i + \mathbf{Q} \mathbf{b}_j \right), \end{aligned} \quad (3-13)$$

$$\text{avec : } \|d_{ij}\|_2^2 = \mathbf{d}_{ij}^T \mathbf{d}_{ij}.$$

Par conséquent, le calcul de la distance minimale, revient donc à déterminer les valeurs optimales des coefficients d_i et d_j . Selon le théorème des KKT, les multiplicateurs de Lagrange λ avec $\lambda_i \geq 0$ et $i = 1, \dots, 4$, associés aux contraintes sont introduits. Par ce fait, la fonction Lagrangienne $L(d_i, d_j, \lambda)$ est définie telle que :

$$L(d_i, d_j, \lambda) = f(d_i, d_j) + \lambda^T h(d_i, d_j), \quad (3-14)$$

$$\text{Avec : } \lambda^T = [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3 \quad \lambda_4] \text{ et } h(d_i, d_j) = \begin{bmatrix} -d_i \\ d_i - 1 \\ -d_j \\ d_j - 1 \end{bmatrix}.$$

En substituant $f(d_i, d_j)$ dans (3-14), on obtient l'équation :

$$L(d_i, d_j, \lambda) = \left(d_i \mathbf{p}_i - d_j \mathbf{p}_j - \mathbf{Q} \mathbf{b}_i + \mathbf{Q} \mathbf{b}_j \right)^T \left(d_i \mathbf{p}_i - d_j \mathbf{p}_j - \mathbf{Q} \mathbf{b}_i + \mathbf{Q} \mathbf{b}_j \right) + \lambda^T h(d_i, d_j). \quad (3-15)$$

Afin de trouver une solution optimale, les points $d_i = d_i^*$ et $d_j = d_j^*$ doivent satisfaire les conditions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left. \frac{\partial L(d_i, d_j, \lambda)}{\partial d_i} \right|_{d_i = d_i^*} = 0 \\ \left. \frac{\partial L(d_i, d_j, \lambda)}{\partial d_j} \right|_{d_j = d_j^*} = 0 \end{array} \right., \quad (3-16)$$

Les contraintes formulées dans (3-8) doivent aussi être assurées. Le système d'équations regroupé et simplifié avec toutes les conditions est présenté dans (3-17).

$$\begin{cases}
\left. \frac{\partial L(d_i, d_j, \lambda)}{\partial d_i} \right|_{d_i=d_i^*} = 2\mathbf{p}_i^T (d_i^* \mathbf{p}_i - d_j \mathbf{p}_j - \mathbf{Qb}_i + \mathbf{Qb}_j) - \lambda_1 + \lambda_2 = 0 & (a) \\
\left. \frac{\partial L(d_i, d_j, \lambda)}{\partial d_j} \right|_{d_j=d_j^*} = -2\mathbf{p}_j^T (d_i \mathbf{p}_i - d_j^* \mathbf{p}_j - \mathbf{Qb}_i + \mathbf{Qb}_j) - \lambda_3 + \lambda_4 = 0 & (b) \\
\lambda_1 h(d_i, d_j) \Big|_{d_i=d_i^*} = \lambda_1 (-d_i^*) = 0 & (c) \\
\lambda_2 h(d_i, d_j) \Big|_{d_i=d_i^*} = \lambda_2 (d_i^* - 1) = 0 & (d) \\
\lambda_3 h(d_i, d_j) \Big|_{d_j=d_j^*} = \lambda_3 (-d_j^*) = 0 & (e) \\
\lambda_4 h(d_i, d_j) \Big|_{d_j=d_j^*} = \lambda_4 (d_j^* - 1) = 0 & (f)
\end{cases} \quad (3-17)$$

Le problème tel que présenté peut être résolu de manière analytique. Tout d'abord, les coefficients d_i et d_j sont déterminées pour chaque paire de câbles. Ensuite, la distance minimale est calculée à travers un algorithme exécuté en temps réel.

Ainsi, à partir de (3-17), les multiplicateurs de Lagrange sont activés et désactivés afin de générer les différentes possibilités que d_i et d_j peuvent admettre. Cependant, les multiplicateurs λ_1 et λ_2 ne peuvent pas être activés simultanément puisque d_i ne peut prendre deux valeurs en même temps. De même que λ_3 et λ_4 ne peuvent pas être activés ensembles. La solution du problème est résolue en neuf cas différents :

- Cas 1 : d_i et d_j sont à l'intérieur de la solution définie par les contraintes d'inégalité, soit $0 \leq d_i \leq 1$ et $0 \leq d_j \leq 1$, par conséquent, les multiplicateurs de Lagrange sont désactivés, $\lambda_i = 0$ avec $i = 1, \dots, 4$. À partir des équations (3-17.a) et (3-17.b), on obtient :

$$\begin{bmatrix} \rho_i^T \rho_i & -\rho_i^T \rho_j \\ -\rho_j^T \rho_i & \rho_j^T \rho_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_i^* \\ d_j^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_i^T Q \mathbf{b}_{ij} \\ -\rho_j^T Q \mathbf{b}_{ij} \end{bmatrix}, \quad (3-18)$$

Avec : $\mathbf{b}_{ij} = \mathbf{b}_i - \mathbf{b}_j$. La solution pour déterminer les coefficients peut être résolue à partir de (3-18).

- Cas 2 : on considère que d_j est à la limite supérieure de la contrainte d'inégalité et d_i est libre. Par ce fait, $\lambda_4 = 1$ est activé et $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ sont désactivés. $\lambda_3 = 0$ est désactivé puisque ce dernier ne peut être activé avec λ_4 . À partir, des équations (3-17.a) et (3-17.f) les coefficients sont déterminés comme suit :

$$\begin{cases} d_i^* = \frac{\rho_i^T \rho_j + \rho_i^T Q \mathbf{b}_{ij}}{\rho_i^T \rho_i}, \\ d_j^* = 1 \end{cases}, \quad (3-19)$$

- Cas 3 : d_j est situé à la limite inférieure de la contrainte d'inégalité. Par conséquent, $\lambda_3 = 1$ est activé et $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ sont désactivés de même que $\lambda_4 = 0$. Le problème peut être résolu à partir des équations (3-17.a) et (3-17.e) :

$$\begin{cases} d_i^* = \frac{\mathbf{p}_i^T \mathbf{Q} \mathbf{b}_{ij}}{\mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_i} , \\ d_j^* = 0 \end{cases} \quad (3-20)$$

- Cas 4 : suppose que d_i correspond à la limite supérieure de la contrainte d'inégalité et d_j est libre. Ainsi, $\lambda_2 = 1$ est activé et $\lambda_3 = \lambda_4 = 0$ sont désactivés. En outre, $\lambda_1 = 0$ n'est pas activé puisque λ_2 l'est. En simplifiant les équations (3-17.b) et (3-17.d), on trouve le résultat suivant :

$$\begin{cases} d_i^* = 1 \\ d_j^* = \frac{\mathbf{p}_j^T \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j^T \mathbf{Q} \mathbf{b}_{ij}}{\mathbf{p}_j^T \mathbf{p}_j} , \end{cases} \quad (3-21)$$

- Cas 5 : d_i est situé à la limite inférieure de la contrainte d'inégalité et d_j est libre. Par conséquent, $\lambda_1 = 1$ est activé et $\lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_2 = 0$ sont désactivés. À partir de (3-17.b) et (3-17.c), on a :

$$\begin{cases} d_i^* = 0 \\ d_j^* = \frac{-\mathbf{p}_j^T \mathbf{Q} \mathbf{b}_{ij}}{\mathbf{p}_j^T \mathbf{p}_j}, \end{cases} \quad (3-22)$$

- Cas 6 : on considère que d_i est à la limite supérieure de la contrainte d'inégalité et d_j à la limite inférieure. Cela implique que $\lambda_2 = 1$ et $\lambda_3 = 1$ sont activés, et $\lambda_1 = \lambda_4 = 0$ sont désactivés. La solution réside dans les équations (3-17.d) et (3-17.e) telle que :

$$\begin{cases} d_i^* = 1 \\ d_j^* = 0 \end{cases}, \quad (3-23)$$

- Cas 7 : on admet que d_i est situé à la limite inférieure de la contrainte d'inégalité et d_j à la limite supérieure. Ainsi, $\lambda_1 = 1$ et $\lambda_4 = 1$ sont activés, et $\lambda_2 = 0$ ainsi que $\lambda_3 = 0$ sont désactivés. Les équations (3-17.c) et (3-17.f) permettent d'obtenir le résultat ci-dessous :

$$\begin{cases} d_i^* = 0 \\ d_j^* = 1 \end{cases}, \quad (3-24)$$

- Cas 8 : d_i et d_j correspondent à la limite supérieure des contraintes. Par conséquent, $\lambda_2 = \lambda_4 = 1$ sont activés et $\lambda_1 = \lambda_3 = 0$ sont désactivés. La solution est obtenue à partir des équations (3-17.d) et (3-17.f) où :

$$\begin{cases} d_i^* = 1 \\ d_j^* = 1 \end{cases}, \quad (3-25)$$

La distance d_{ij} correspond à la distance entre les deux enrouleurs A_i et A_j .

- Cas 9 : dans ce dernier cas d_i et d_j correspondent à la limite inférieure des contraintes, $\lambda_1 = \lambda_3 = 1$ sont activés et $\lambda_2 = \lambda_4 = 0$ sont désactivés. Les équations (3-17.c) et (3-17.e) sont utilisées pour déterminer la solution :

$$\begin{cases} d_i^* = 0 \\ d_j^* = 0 \end{cases}, \quad (3-26)$$

La distance d_{ij} correspond à la distance entre les deux points B_i et B_j . Afin d'éviter toute confusion, les neuf cas de la solution sont nommés cas-KKT. Après avoir déterminé tous les cas, la seconde étape correspond au calcul de la distance d_{ij} à partir de l'équation (3-13) pour chaque valeur de d_i et d_j . Le résultat optimal sera de sélectionner la valeur

minimale calculée de d_{ij} . La figure 3-7 illustre le procédé de calcul de distance entre chaque paire de câbles.

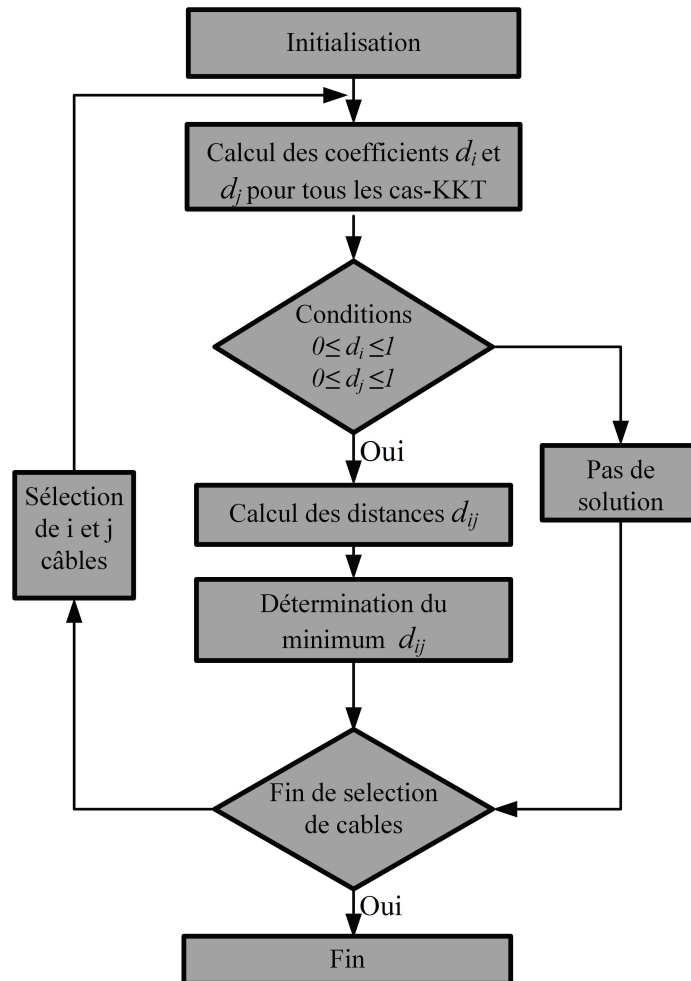


Figure 3-7 : Algorithme pour le calcul de distance entre chaque paire de câbles

Il se déroule comme suit : tout d'abord, deux câbles i et j sont sélectionnés afin de déterminer les coefficients d_i et d_j pour chacun des neuf cas. Ces coefficients sont ensuite

vérifiés avec les contraintes formulées dans (3-8) puisque dans certain cas-KKT la valeur des coefficients peut être inférieur à zéro ou supérieur à 1. Cette vérification permet de prendre en compte les potentielles erreurs de calculs numériques comme la division de matrice. Dans le cas où les contraintes sont respectées, la prochaine étape consiste à calculer la distance d_{ij} selon l'équation (3-13). Par la suite la distance minimale calculée est sélectionnée. Par contre, dans le cas où les contraintes ne sont pas respectées, aucune solution n'est considérée pour la distance d_{ij} . Une fois que la distance est déterminée, l'algorithme considère une autre paire de câbles pour un nouveau calcul. La section suivante présente des résultats de deux expérimentations pratiquées sur le MPEC pour la validation de l'algorithme.

3.4 Expérimentations de la méthode de calcul de distance minimale

L'algorithme présenté à la figure 3-7 ainsi que les modèles géométrique et cinématique ont été mis en œuvre sur Matlab-Simulink et compilés avec RT-LAB afin de les exécuter en temps réel. La plateforme mobile est positionnée à une pose égale à $[1.56 \ 3.24 \ 1.22 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ dans la première expérience. Pour toutes les expérimentations, les unités sont en mètres pour la position et en radians pour les orientations. Les enrouleurs et les points d'attache sont respectivement à une position fixe par rapport au repère de base et au centre de masse de la plateforme mobile. Le tableau 3-1 présente les valeurs cartésiennes de ces positions.

Tableau 3-1 : Position cartésienne réelle des enrouleurs et des points d'attache

Enrouleurs	A_i (Mètre)	Points d'attache	B_i (Mètre)
A1	$[-0.149 \ 3.894 \ 2.904]^T$	B1	$[0.069 \ -0.04 \ 0.08]^T$
A2	$[3.562 \ 3.87 \ 2.904]^T$	B2	$[-0.02 \ -0.18 \ 0.16]^T$
A3	$[0.064 \ 4.587 \ 0.84]^T$	B3	$[0.069 \ -0.006 \ -0.06]^T$
A4	$[3.439 \ 4.587 \ 0.84]^T$	B4	$[0.069 \ -0.22 \ -0.059]^T$
A5	$[0.01 \ 0.12 \ 0.782]^T$	B5	$[-0.07 \ -0.006 \ -0.06]^T$
A6	$[3.385 \ 0.12 \ 0.782]^T$	B6	$[-0.07 \ -0.22 \ -0.06]^T$
A7	$[1.67 \ -0.08 \ 2.9]^T$	B7	$[-0.07 \ -0.04 \ 0.08]^T$

À cet instant, les coefficients d_i et d_j sont déterminés pour chaque paire de câbles et pour chaque cas-KKT défini à la section précédente 3.3.2. En d'autres termes, pour chaque paire de câbles, les coefficients admettent neuf solutions possibles. Ces dernières sont ensuite vérifiées selon les conditions établies dans (3-8). Si aucun cas ne respecte la condition, aucune solution n'est proposée pour cette paire de câbles. Après le calcul des coefficients, la distance minimale est déterminée selon l'équation (3-7) pour chaque cas-KKT admissible. Généralement, la distance minimale entre chaque paire de câbles est sélectionnée à partir de neuf solutions correspondant aux neuf cas-KKT. Par ailleurs, le mécanisme étudié comprend sept câbles, par conséquent, vingt-une combinaison (i, j) de câbles peuvent se former comme présenté ci-dessous :

$$(i, j) = \left\{ \begin{array}{l} (1,2), (1,3), (1,4), (1,5), (1,6), (1,7), (2,3), (2,4), (2,5), (2,6), (2,7), \\ (3,4), (3,5), (3,6), (3,7), (4,5), (4,6), (4,7), (5,6), (5,7), (6,7) \end{array} \right\}.$$

Le tableau 3-2 présente les résultats obtenus où on constate que pour chaque paire de câbles la distance minimale qui a été sélectionnée correspond au neuvième cas-KKT. Par conséquent, la distance minimale est celle entre les deux points d'attache sur la plateforme mobile B_i et B_j . La figure 3-8 représente un exemple de la distance minimale entre les câbles 3 et 4 de la première expérience avec une vue de haut du MPEC.

Dans la deuxième expérience, la pose est égale à $[1.56 \ 3.24 \ 1.22 \ -0.3433 \ 0.8109 \ 0.6906]^T$ de la plateforme mobile. Le tableau 3-3 présente les résultats obtenus du calcul de distance à cette pose. On constate que la distance minimale correspond dans la plupart des cas au neuvième cas-KKT. Quant aux distances minimales des paires de câbles (2,4) et (5,7), ces dernières ont été calculées à partir du cinquième cas-KKT, à savoir l'équation (3-22). De même que pour la distance minimale entre les câbles 4 et 6 où le calcul a été déterminé à partir de l'équation (3-20).

Tableau 3-2 : Calcul de la distance minimale pour la première expérience

(i, j)	d_{ij} (Mètre)	Cas-KKT
Câble (1,2)	0.1804	9
Câble (1,3)	0.1533	9
Câble (1,4)	0.2379	9
Câble (1,5)	0.2074	9
Câble (1,6)	0.2764	9
Câble (1,7)	0.1397	9
Câble (2,3)	0.2944	9
Câble (2,4)	0.2415	9
Câble (2,5)	0.2851	9
Câble (2,6)	0.2311	9
Câble (2,7)	0.1644	9
Câble (3,4)	0.2191	9
Câble (3,5)	0.1397	9
Câble (3,6)	0.2598	9
Câble (3,7)	0.2081	9
Câble (4,5)	0.2598	9
Câble (4,6)	0.1397	9
Câble (4,7)	0.2764	9
Câble (5,6)	0.2191	9
Câble (5,7)	0.1543	9
Câble (6,7)	0.2391	9

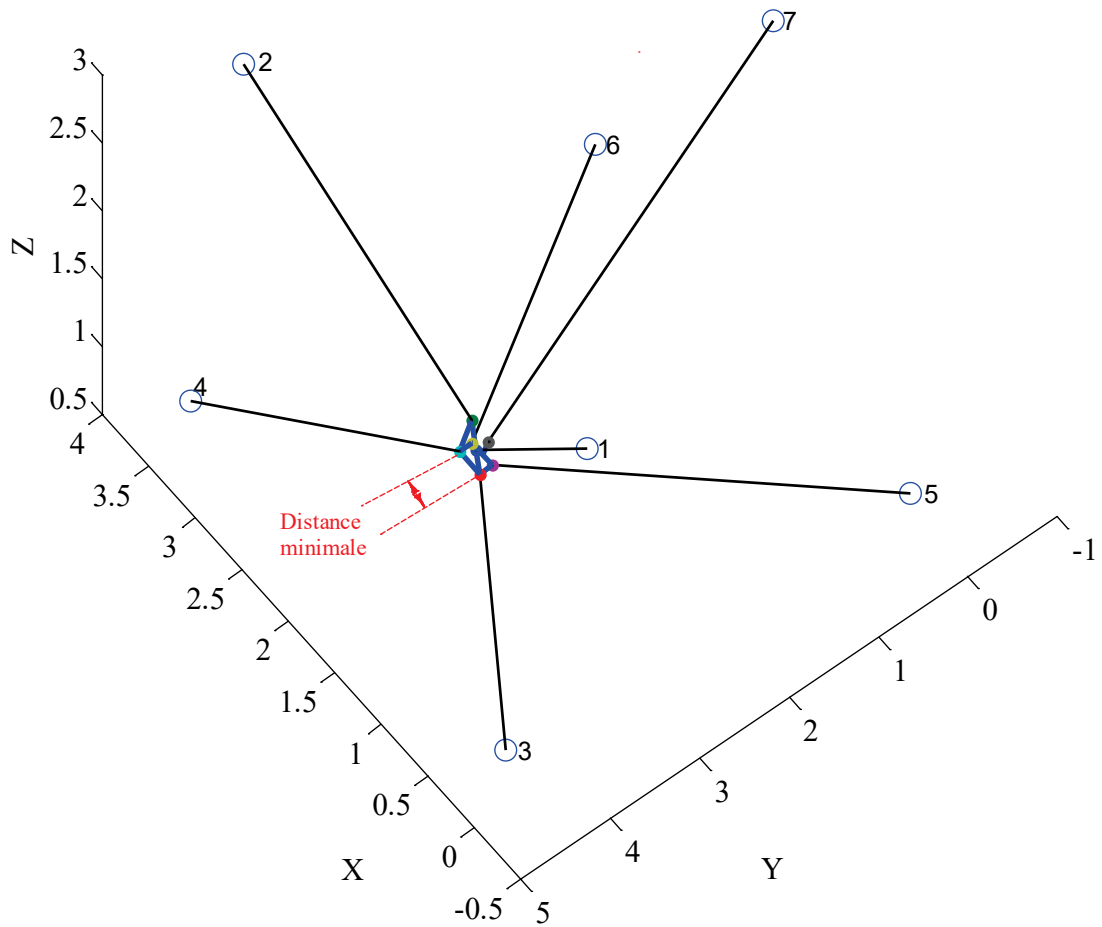


Figure 3-8 : Illustration sur le MPEC du calcul de distance minimale pour la première expérience

La figure 3-9 représente un exemple de la distance minimale entre les câbles (5,7) de la deuxième expérience. À travers ces expériences, la méthode proposée permet de déterminer la distance minimale entre chaque paire de câbles et de prendre en compte les contraintes physiques telles que les longueurs des câbles.

Tableau 3-3 : Calcul de la distance minimale pour la deuxième expérience

(i, j)	d_{ij} (Mètre)	Cas-KKT
Câble (1,2)	0.1804	9
Câble (1,3)	0.1533	9
Câble (1,4)	0.2379	9
Câble (1,5)	0.2074	9
Câble (1,6)	0.2764	9
Câble (1,7)	0.1397	9
Câble (2,3)	0.2944	9
Câble (2,4)	0.2235	5
Câble (2,5)	0.2851	9
Câble (2,6)	0.2311	9
Câble (2,7)	0.1644	9
Câble (3,4)	0.2191	9
Câble (3,5)	0.1397	9
Câble (3,6)	0.2598	9
Câble (3,7)	0.2081	9
Câble (4,5)	0.2598	9
Câble (4,6)	0.1360	3
Câble (4,7)	0.2764	9
Câble (5,6)	0.2191	9
Câble (5,7)	0.1400	5
Câble (6,7)	0.2391	9

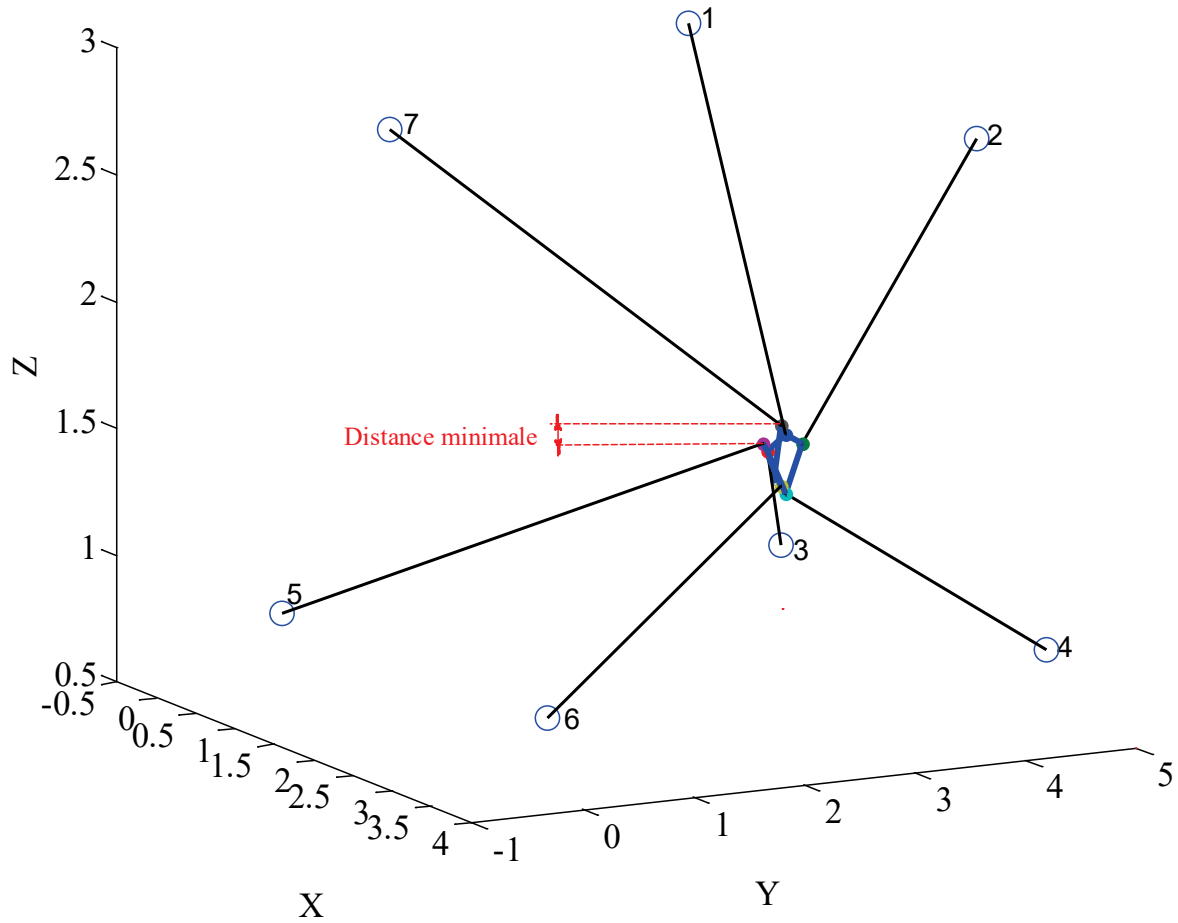


Figure 3-9 : Illustration sur le MPEC du calcul de distance minimale pour la deuxième expérience

La distance minimale est calculée à partir des conditions de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) du problème d'optimisation. Les minimaux locaux sont déterminés dans chaque calcul puisque les équations sont égales à zéro dans les cas-KKT. Ceci assure le minimum local dans chaque cas-KKT, puis la sélection de la valeur minimale permet de trouver le minimum global.

3.5 Discussion et conclusion

Le mécanisme parallèle entraîné par sept câbles étudié dans ce projet de recherche est introduit dans ce chapitre. Il a notamment été utilisé pour des expérimentations et des simulations à travers les modèles géométrique et cinématique qui sont aussi abordés dans cette partie. En outre, pour donner suite aux conclusions présentées au chapitre 2, une nouvelle méthode de calcul de distance est proposée. Cette approche a été appliquée pour calculer l'écart entre chaque paire de câbles. Afin de prendre en compte les contraintes physiques des câbles, des conditions sont appliquées dont la solution a été formulée en un problème d'optimisation non linéaire. La méthode de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) est appliquée pour résoudre le problème d'optimisation ainsi qu'un algorithme, exécuté en temps réel, pour déterminer la distance minimale entre chaque paire de câbles.

Les expérimentations démontrent la validité la méthode de calcul de distance minimale entre les câbles. Toutefois, dans certains cas une petite imprécision sur le résultat du calcul de distance a été observée. Par ce fait, la sélection de la distance minimale parmi les cas-KKT peut être influencée par cette imprécision. Cette dernière est produite par les simplifications des hypothèses émises au début de l'analyse géométrique et cinématique. En effet, les câbles ne sont pas complètement droits et en tension dans certaines trajectoires de la plateforme mobile. La méthode de calcul de distance intègre une stratégie de commande interactive, abordée au chapitre suivant, qui permet de gérer les interférences entre les câbles pendant l'interaction physique avec le mécanisme entraîné par sept câbles.

CHAPITRE 4

COMMANDE INTERACTIVE AVEC GESTION DES INTERFÉRENCES

Ce chapitre traite une loi de commande permettant l'interaction physique et la gestion des interférences sans provoquer de croisement ni de relâchement de l'un des câbles. En premier lieu, une revue de littérature sur les interférences entre les câbles ainsi que les commandes interactives sont proposées. En second lieu, la commande, basée sur un modèle en admittance, est abordée dans laquelle une force d'interférence virtuelle est déterminée afin d'éviter le croisement des câbles. Par ce fait, la tâche est exécutée jusqu'aux limites des possibilités géométriques cinématiques du mécanisme. Des simulations ainsi que des expérimentations sur le mécanisme sont présentées à la fin de ce chapitre.

4.1 Introduction

La recherche sur les mécanismes parallèles entraînés par des câbles est devenue un sujet qui a reçu beaucoup d'attention ces dernières années. De nombreuses solutions sont adressées pour des problématiques couvrant l'évaluation de l'espace de travail [91-93] et le calcul de tension minimum dans les câbles [94-97]. D'autres études proposent des algorithmes pour la gestion des interférences entre câbles-câbles, câbles-plateforme mobile ou mécanisme avec son environnement [81]. Dans notre cas, nous nous concentrons sur les interférences entre les câbles puisque le croisement pourrait générer un rendu haptique imprévisible pour l'opérateur comme des vibrations ou un effet de glissement lors d'une interaction physique. En outre, le croisement peut aussi provoquer une perte de contrôle temporaire ou une incertitude dans la boucle de commande causée par les frottements des câbles [98]. La section suivante présente quelques approches antérieures pour la gestion des interférences.

4.1.1 Interférences entre les câbles

L'une des limitations de l'espace de travail, qui constitue un inconvénient dans certains cas, est l'interférences entre les câbles [99, 100]. La plupart des méthodes proposées dans la littérature permettent la détection et l'évitement des interférences, comme [101], qui propose une conception d'une interface de locomotion actionnée par des câbles pour la

réadaptation à la marche. L'interférence est détectée avec un calcul de distance minimale entre deux droites incluant le fléchissement et le rayon du câble. Une autre solution pour éviter l'interférence est de relâcher l'un des deux câbles en collision [102] permettant à un câble de se plier en deux sections. Le câble relâché est alors considéré comme une défaillance sans affecter la commande cartésienne en position, comme si le câble avait été coupé. Cependant, cette solution peut réduire la taille de l'espace de travail puisque le point de collision entre les deux câbles (le point d'interférence) simule une poulie qui modifie la géométrie du mécanisme lorsque les deux câbles sont pliés l'un sur l'autre. Puisque le déplacement du mécanisme est suivi par le déplacement du point d'interférence, la taille de l'espace de travail est modifiée [100]. Les auteurs dans [103] présentent une méthode basée sur le théorème de séparation des axes (*Separating Axis Theorem*) appliquée sur un système de capture de mouvement actif (motion tracker). Le tracker actif est composé de deux mécanismes (la base rotative et la plateforme) reliés par trois câbles. Toutefois, cette méthode peut indiquer une interférence alors que cette dernière ne va pas se produire, dans ce cas l'espace de travail pourrait être limité inutilement [85].

Bien que ces approches permettent l'évitement des interférences, ces dernières peuvent ne pas convenir pour une interaction physique avec l'humain. En effet, généralement pour éviter une collision entre deux câbles, la trajectoire suivie par la plateforme mobile est modifiée et dans certains cas l'espace de travail peut être limité. Cependant, dans une interaction physique où le MPEC est utilisé comme robot collaboratif, la trajectoire dépend des actions humaines et peut être considérée comme une entrée de commande.

Dans la littérature, on retrouve peu d'études où la collision entre les câbles est permise. Par exemple [104] propose une méthode qui permet la collision entre les câbles afin d'augmenter l'espace de travail. Toutefois, l'approche proposée permet le croisement des câbles. Cette situation peut entraîner des comportements imprévisibles du mécanisme selon la dimension des câbles et du MPEC. En effet, la commande pourrait être perturbée durant un court instant puisque le croisement des câbles peut générer des frottements et des vibrations. Par conséquent, le mécanisme produit des déplacements brusques qui peuvent être non sécuritaires pour l'opérateur dans le cas d'une interaction physique. Dans [105], les auteurs présentent une approche basée sur une commande en admittance où la collision entre un membre du robot sériel et l'environnement est admise. En effet, la tâche de collaboration est exécutée dans la limite des possibilités de la cinématique du robot en éliminant une colonne dans la jacobienne qui correspond à la position du point de collision.

Cette approche est aussi appliquée dans le cas d'un MPEC [106] où un algorithme sélectionne un câble à relâcher lorsqu'une interférence se produit. Les résultats présentés démontrent que la méthode est concluante. Cependant, cette méthode pourrait provoquer des difficultés dans les déplacements de notre mécanisme. En effet, principalement deux câbles sont requis afin de tirer la plateforme mobile vers le haut et permettent des déplacements verticaux. Si l'un de ces deux câbles est relâché, le déplacement pourrait être compromis. Dans notre travail, nous considérons une nouvelle alternative pour gérer le point de collision en évitant le croisement et le relâchement entre les câbles lors de l'interaction physique.

4.1.2 Commande interactive

En interaction physique, les actions humaines sont considérées comme un point de consigne dans la commande qui peut générer des trajectoires de la plateforme mobile. Généralement, on retrouve deux types de commandes interactives (haptiques) dans la littérature : la commande avec un modèle en admittance et la commande avec un modèle en impédance. De manière générale, sans considérer les cas particuliers, à partir du modèle dynamique, la commande par impédance représente un modèle interne dont la consigne est générée par une fonction de transfert qui prend une entrée de déplacement et génère de la force en sortie. Par contre, la commande par admittance reçoit en entrée les forces mesurées, et génère des déplacements en sortie. La commande par impédance est utilisée avec des systèmes comprenant peu d'inertie dont les frottements sont limités contrairement à la commande par admittance, qui permet une grande liberté dans la conception mécanique. En effet, le jeu mécanique et l'inertie peuvent être compensés, elle est utilisée dans des systèmes dotés d'une grande inertie et où les frottements sont un facteur important. Par conséquent, les mécanismes utilisant la commande en admittance peuvent afficher des rigidités élevées et des forces élevées [107, 108] [109, 110].

Ces deux commandes sont largement utilisées dans diverses applications [111], conjointement avec d'autres commandes (modèles hybrides) [112, 113] ou indépendamment. Par exemple, Fortin-Côté et al. [114] présente une commande par admittance permettant de simuler des surfaces lisses et des bordures dans un environnement virtuel afin d'éviter

d'entrer en collision avec des objets pendant la collaboration. Elle est appliquée sur un MPEC et consiste à adapter la commande en calculant la force désirée. Cette dernière est déterminée à partir d'une force résultante entre la force appliquée et celle générée par l'environnement virtuel sur la base d'un modèle à ressort et d'un coefficient d'amortissement pour assurer la stabilité du système. Une autre approche, basée sur une commande en admittance présentée dans [115], propose de générer une force virtuelle afin de guider l'opérateur dans l'espace de travail en utilisant un ressort virtuel comme retour de force. Cependant, une situation inconfortable pourrait se produire pour l'opérateur puisque l'intensité de la force générée est constante. Pour éviter cette situation, une nouvelle méthode est proposée en utilisant une commande basée sur un modèle en admittance puisque le MPEC étudié contient des frottements importants dans les enrouleurs. La section suivante introduit ce modèle.

4.2 Commande en admittance pour l'interaction physique

Un aperçu de la commande est illustré à figure 4-1, ce dernier a été inspiré de [116]. En premier lieu, le capteur de force disposé sur la plateforme mobile permet de mesurer et de récupérer l'intensité ainsi que la direction appliquée. Ce signal est ensuite interprété et converti à travers le modèle d'admittance en une position, vitesse et accélération désirée. Ces dernières sont traitées afin d'assurer la sécurité de l'opérateur et d'éviter de grandes vitesses et de grandes accélérations. En effet, les vitesses et les accélérations sont limitées en appliquant des seuils, et la position à l'aide d'un mur virtuel. Ce dernier consiste à définir l'espace de travail du MPEC en imposant une limite logicielle aux extrémités de la structure.

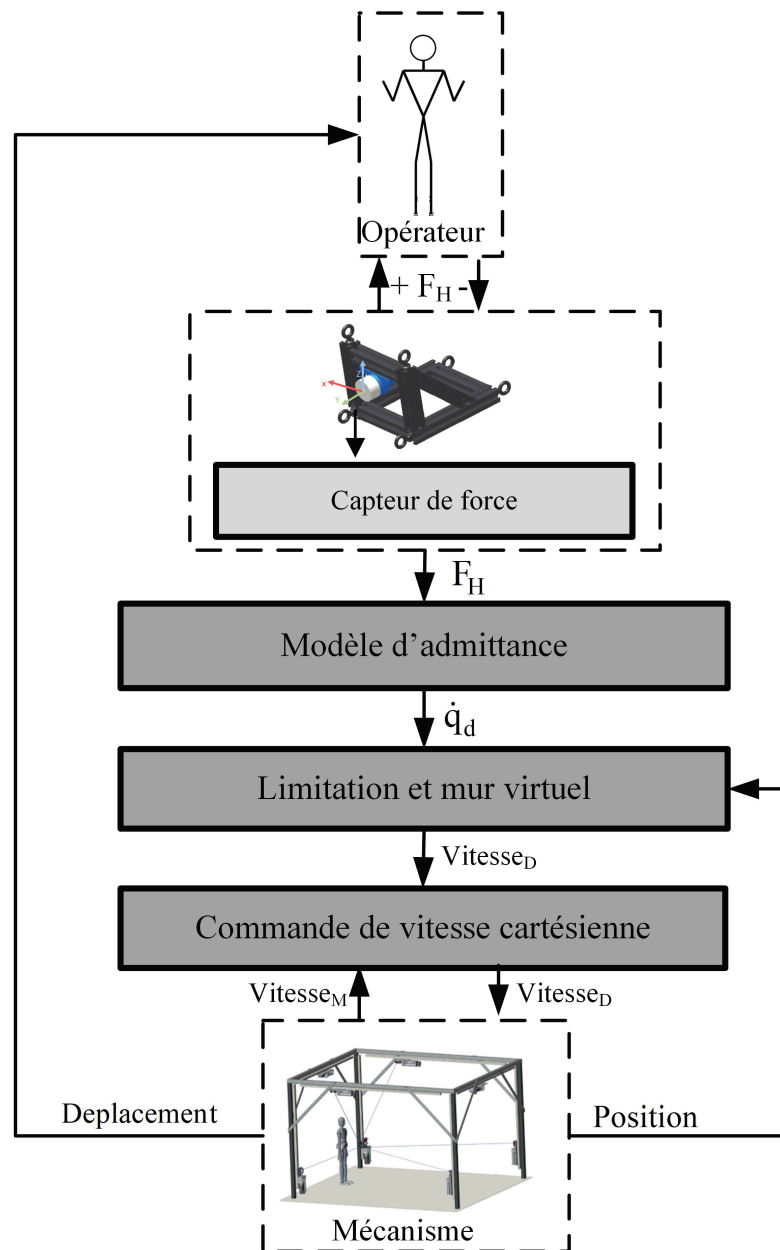


Figure 4-1 : Schéma général de la commande en admittance

La vitesse désirée qui en résulte, ainsi que celle mesurée sont ensuite envoyées à une commande de vitesse cartésienne afin d'assurer le suivi dans la boucle de rétroaction.

L'équation différentielle ordinaire du second ordre pour un système dynamique est représentée comme suit :

$$F_H = M(\ddot{X} - \ddot{X}_0) + C(\dot{X} - \dot{X}_0) + K(X - X_0), \quad (4-1)$$

où F_H est la force d'interaction appliquée par l'humain, M est la masse virtuelle, C représente l'amortissement virtuel et K est la raideur virtuelle; l'accélération, la vitesse et la consigne de position sont respectivement nommées \ddot{X}, \dot{X}, X , $\ddot{X}_0, \dot{X}_0, X_0$ représentent respectivement l'accélération, la vitesse et la position initiale. Ces dernières correspondent aux paramètres désirés lors d'un mouvement contraint. Cependant, ces paramètres ainsi que la raideur K sont à zéro afin de simuler un mouvement libre. En effet, la position, la vitesse et l'accélération suivie par le MPEC sont déterminées directement par l'humain. Par conséquent, l'équation est simplifiée comme suit :

$$F_H = M\ddot{X} + C\dot{X}, \quad (4-2)$$

Il est à noter que $\ddot{X} = \frac{\partial^2 X}{\partial t^2}$ et $\dot{X} = \frac{\partial X}{\partial t}$. Généralement, la trajectoire du mécanisme peut être amenée soit par une position désirée, une vitesse désirée ou un torseur désiré. Ici, puisque nous souhaitons une commande en admittance, la vitesse sera utilisée. Ainsi, la vitesse désirée peut être écrite, dans le domaine de Laplace, sous la forme :

$$F_d(S) = M S^2 X(S) + C SX(S), \quad (4-3)$$

ou F_d représente la force appliquée par l'opérateur est donc la force désirée. On peut donc en déduire l'équation d'admittance suivante :

$$SX(S) = \dot{X}(S) = \frac{1}{MS + C} F_d(S), \quad (4-4)$$

En appliquant la transformée de Laplace sur l'équation (3-6), on obtient :

$$\dot{q}(S) = J \dot{X}(S), \quad (4-5)$$

Enfin, en remplaçant l'équation (4-4) par (4-5), le résultat est :

$$\dot{q}_d(S) = J \frac{1}{MS + C} F_d(S), \quad (4-6)$$

À partir de l'équation (4-6), on obtient les vitesses désirées en fonction de la force appliquée par l'opérateur. Toutefois, pendant l'interaction physique, les câbles peuvent être amenés à se croiser et ainsi créer un comportement imprévisible du MPEC. La section suivante discute de la théorie appliquée pour gérer ces croisements qu'on nomme interférences.

4.3 Adaptation de la commande avec gestion des interférences

Lorsqu'une interférence entre les câbles se produit dans un mécanisme avec des frottements importants, ce dernier peut réagir de manière imprévisible si les câbles se croisent. Les frottements du système (au point de croisement des câbles et aux enrouleurs) génèrent des forces qui s'opposent aux mouvements du mécanisme. Par conséquent, des déplacements brusques sont produits une fois les frottements surmontés. L'approche proposée dans cette section permet d'adapter la trajectoire de la plateforme mobile sans provoquer une telle réaction. En effet, elle consiste à générer une force virtuelle qui s'ajoute à la commande en admittance pour en générer une résultante qui représente la force désirée. Cette dernière est définie comme suit :

$$\mathbf{F}_d = \mathbf{F}_H + \mathbf{F}_{\text{int}}, \quad (4-7)$$

où \mathbf{F}_H et \mathbf{F}_{int} représentent respectivement la force appliquée par l'humain qui est mesurée par le capteur et la force générée pour éviter une interférence entre deux câbles. La figure 4-2 illustre la force d'interférence (virtuelle) calculée et introduite à la commande. Le modèle d'admittance présenté à la section 4.2, permet de convertir la force désirée en des vitesses articulaires. Par la suite, ces dernières sont transmises aux enrouleurs à travers un régulateur en vitesse contenant un correcteur PID. À partir du déplacement des câbles, la pose (position et rotation) de la plateforme mobile est évaluée avec le PGD, et présentée à la méthode de

gestion des interférences. La distance entre chaque paire de câbles est calculée avec l'approche proposée à la section 3.3 afin d'identifier ceux qui sont en interférence. Dans le cas où la distance entre les câbles est supérieure à un seuil présélectionné, la force générée est nulle. En effet, une petite distance minimale est imposée pour prendre en considération les erreurs de calcul incluant les simplifications des hypothèses et le rayon autour du câble. Dans le cas où la distance entre les câbles est inférieure au seuil, le vecteur force \mathbf{F}_{int} est calculé.

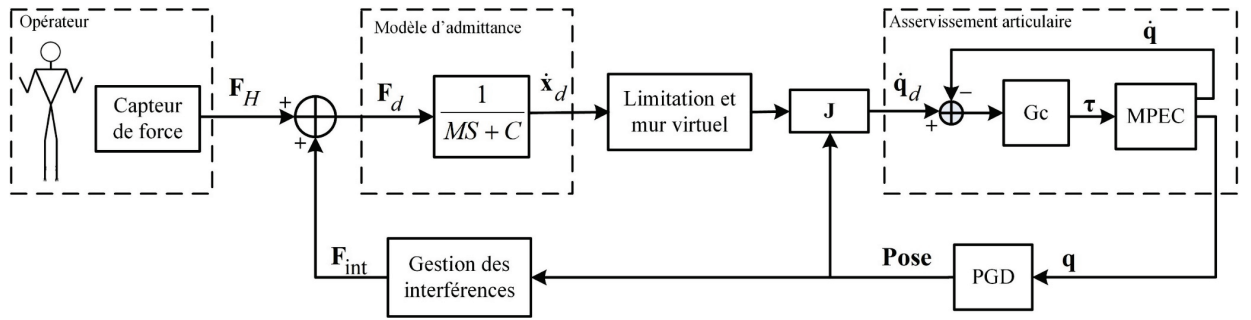


Figure 4-2 : Schéma de commande avec gestion des interférences

Dans cette section, quatre parties sont identifiées, la première et la deuxième partie discutent de deux solutions mathématiques qui permettent d'obtenir la direction du vecteur de force. En effet, la première solution prend en considération uniquement les translations, par conséquent le vecteur force \mathbf{F}_{int} est défini en trois dimensions où :

$\mathbf{F}_{\text{int}} = [f_x \ f_y \ f_z]^T$. La seconde solution présente un développement mathématique en tenant compte des translations et rotations. Par ce fait, le vecteur \mathbf{F}_{int} est résolu en six

dimensions où : $\mathbf{F}_{\text{int}} = [f_x \ f_y \ f_z \ M_x \ M_y \ M_z]^T$. Dans ce cas, \mathbf{F}_{int} représente un torseur incluant les forces et les moments de couple. Afin de faciliter la compréhension et la distinction entre les deux méthodes, \mathbf{F}_{int} correspond au vecteur force d'interférence dans le cas de la première solution (translation uniquement) et au torseur d'interférence dans le cas de la deuxième solution (translation et rotation). En outre, une démonstration mathématique est proposée permettant d'établir un lien entre ces deux solutions qui aboutissent au même résultat. La troisième étape discute d'une approche pour déterminer l'intensité du vecteur force et du torseur d'interférence. Enfin la dernière partie propose un algorithme temps réel pour la gestion des interférences.

4.3.1 Détermination de la direction du vecteur force d'interférence

L'objectif est de permettre un déplacement tout en empêchant le croisement entre une paire de câbles. Ainsi, une force est appliquée pour empêcher les câbles de se croiser et de se plier. En d'autres termes, la direction de cette force admet un déplacement uniquement sur le plan de l'interférence pour éviter le croisement des câbles. En outre, l'opérateur sentira une force de réaction artificielle l'empêchant de déplacer la plateforme MPEC dans une direction normale du plan d'interférence. Contrairement aux forces générées par un modèle à ressort haptique, l'opérateur pourra se déplacer sur le plan interférentiel sans le traverser. Par conséquent, le vecteur \mathbf{F}_{int} dépend du vecteur de la distance entre les deux câbles \mathbf{d}_{ij} et doit se diriger vers le sens positif (où la distance augmente) de ce dernier. Pour déterminer cette

direction, le vecteur \mathbf{p} peut nous renseigner sur la plateforme mobile et ainsi, évaluer la distance d_{ij} à chaque instant. Mathématiquement, pour déterminer la variation de d_{ij} par rapport au vecteur \mathbf{p} , cela conduit à calculer le gradient qui est défini comme suit :

$$\nabla_{ij} = \frac{\partial d_{ij}}{\partial \mathbf{p}}, \quad (4-8)$$

Afin de déterminer la dérivée et isoler les paramètres qui dépendent de \mathbf{p} , d_{ij} est développé à partir de l'équation (3-7), par conséquent :

$$d_{ij}^2 = d_i^2 \mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_i + d_j^2 \mathbf{p}_j^T \mathbf{p}_j - 2d_i d_j \mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_j - 2\mathbf{b}_{ij}^T (d_i \mathbf{p}_i - d_j \mathbf{p}_j) + \mathbf{b}_{ij}^T \mathbf{b}_{ij}, \quad (4-9)$$

avec : $d_{ij}^2 = \mathbf{d}_{ij}^T \mathbf{d}_{ij}$ et $\mathbf{b}_{ij} = \mathbf{b}_i - \mathbf{b}_j$.

Il est à noter que la matrice de rotation \mathbf{Q} n'est pas représentée dans les équations afin de faciliter l'écriture puisque cette dernière est égale à l'identité dans le cas où les rotations ne sont pas prises en compte. Les paramètres d_i et d_j dépendant aussi de \mathbf{p} telles que définies précédemment, ainsi que les longueurs des câbles \mathbf{p}_i et \mathbf{p}_j . La dérivée par rapport à \mathbf{p} sur les deux côtés de l'équation (4-9), permet d'obtenir l'équation suivante :

$$\frac{\partial d_{ij}}{\partial \mathbf{p}} = \left(\frac{d_i \mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_i - d_j \mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_j - \mathbf{b}_{ij}^T \mathbf{p}_i}{d_{ij}} \right) \frac{\partial d_i}{\partial \mathbf{p}} + \left(\frac{d_j \mathbf{p}_j^T \mathbf{p}_j - d_i \mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_j + \mathbf{b}_{ij}^T \mathbf{p}_j}{d_{ij}} \right) \frac{\partial d_j}{\partial \mathbf{p}} + \mathbf{\beta}_{ij}, \quad (4-10)$$

avec :

$$\mathbf{\beta}_{ij} = \left(\frac{d_i^2}{d_{ij}} \right) \mathbf{p}_i + \left(\frac{d_j^2}{d_{ij}} \right) \mathbf{p}_j - \left(\frac{d_i d_j}{d_{ij}} \right) (\mathbf{p}_i + \mathbf{p}_j) + \left(\frac{d_j - d_i}{d_{ij}} \right) \mathbf{b}_{ij}.$$

Par ailleurs, il est à noter que la dérivée de $\frac{\partial \mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_i}{\partial \mathbf{p}} = 2\mathbf{p}_i$, sachant que $\mathbf{p}_i = \mathbf{p} + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i$ et que

$$\frac{\partial \mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_i}{\partial \mathbf{p}} = \frac{\partial \mathbf{p}_i^T}{\partial \mathbf{p}} \mathbf{p}_i + \mathbf{p}_i^T \frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial \mathbf{p}} = 2 \frac{\partial \mathbf{p}_i^T}{\partial \mathbf{p}} \mathbf{p}_i. \text{ Toutefois, il reste à définir l'expression des paramètres}$$

$$\frac{\partial d_i}{\partial \mathbf{p}} \text{ et } \frac{\partial d_j}{\partial \mathbf{p}}.$$

À partir des résultats abordés précédemment, les coefficients d_i et d_j peuvent admettre différentes expressions selon le cas KKT sélectionné précédemment. Cependant, afin de formuler l'expression générale, seulement la solution pour le cas 1 décrite par l'équation (3-18) est définie. Par conséquent, à partir de cette équation on a :

$$\begin{cases} d_i \boldsymbol{\rho}_i^T \boldsymbol{\rho}_i - d_j \boldsymbol{\rho}_i^T \boldsymbol{\rho}_j = \boldsymbol{\rho}_i^T \mathbf{b}_{ij} \\ d_j \boldsymbol{\rho}_j^T \boldsymbol{\rho}_j - d_i \boldsymbol{\rho}_j^T \boldsymbol{\rho}_i = -\boldsymbol{\rho}_j^T \mathbf{b}_{ij} \end{cases}, \quad (4-11)$$

avec : $\mathbf{b}_{ij} = \mathbf{b}_i - \mathbf{b}_j$.

En dérivant par rapport à \mathbf{p} et en le transformant sous forme matricielle on obtient :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial d_i}{\partial \mathbf{p}} \\ \frac{\partial d_j}{\partial \mathbf{p}} \end{bmatrix}_{6 \times 1} = (\mathbf{M}_{ij})_{6 \times 6}^{-1} [\boldsymbol{\gamma}_{ij}]_{6 \times 1}, \quad (4-12)$$

$$\text{où : } \boldsymbol{\gamma}_{ij} = \begin{bmatrix} (d_j) (\boldsymbol{\rho}_i + \boldsymbol{\rho}_j) - (2d_i) \boldsymbol{\rho}_i + \mathbf{b}_{ij} \\ (d_i) (\boldsymbol{\rho}_i + \boldsymbol{\rho}_j) - (2d_j) \boldsymbol{\rho}_j - \mathbf{b}_{ij} \end{bmatrix},$$

$$\text{et : } \mathbf{M}_{ij} = \begin{pmatrix} (\boldsymbol{\rho}_i^T \boldsymbol{\rho}_i) & 0 & 0 & -(\boldsymbol{\rho}_i^T \boldsymbol{\rho}_j) & 0 & 0 \\ 0 & (\boldsymbol{\rho}_i^T \boldsymbol{\rho}_i) & 0 & 0 & -(\boldsymbol{\rho}_i^T \boldsymbol{\rho}_j) & 0 \\ 0 & 0 & (\boldsymbol{\rho}_i^T \boldsymbol{\rho}_i) & 0 & 0 & -(\boldsymbol{\rho}_i^T \boldsymbol{\rho}_j) \\ -(\boldsymbol{\rho}_j^T \boldsymbol{\rho}_i) & 0 & 0 & (\boldsymbol{\rho}_j^T \boldsymbol{\rho}_j) & 0 & 0 \\ 0 & -(\boldsymbol{\rho}_j^T \boldsymbol{\rho}_i) & 0 & 0 & (\boldsymbol{\rho}_j^T \boldsymbol{\rho}_j) & 0 \\ 0 & 0 & -(\boldsymbol{\rho}_j^T \boldsymbol{\rho}_i) & 0 & 0 & (\boldsymbol{\rho}_j^T \boldsymbol{\rho}_j) \end{pmatrix}.$$

La forme générale du gradient est exprimée avec les équations (4-10) et (4-12). Toutefois, il est nécessaire de déterminer le vecteur unitaire puisque le changement de direction engendré par le gradient peut provoquer des déplacements brusques pour l'utilisateur. Par conséquent, le vecteur gradient est divisé par sa norme comme suit :

$$\nabla \mathbf{F}_{ij} = \frac{\frac{\partial d_{ij}}{\partial \mathbf{p}}}{\left\| \frac{\partial d_{ij}}{\partial \mathbf{p}} \right\|}, \quad (4-13)$$

L'équation (4-13) correspond à la solution permettant de calculer la direction du vecteur gradient en considérant les translations uniquement. La section suivante introduit les rotations et propose un nouveau calcul de la direction du vecteur $\nabla \mathbf{F}_{ij}$.

4.3.2 Détermination de la direction du torseur d'interférence

Dans la première solution, d_{ij} est dérivée par rapport à \mathbf{p} pour déterminer la direction dans le sens positif selon le déplacement en translation de la plateforme. Toutefois, pour connaître la direction en translation et rotation, la dérivée doit se réaliser selon \mathbf{p} et \mathbf{Q} . En d'autres termes, cela conduit à déterminer le gradient de d_{ij} par rapport au vecteur \mathbf{p} et \mathbf{Q} . L'expression de la dérivée par rapport à la matrice \mathbf{Q} est complexe à déterminer puisque

les rotations dépendent des trois angles d'Euler ϕ, θ, ψ . En effet, la matrice \mathbf{Q} selon la convention ZXY est définie comme suit :

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \cos(\theta)\cos(\psi) - \sin(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) & -\cos(\phi)\sin(\psi) & \cos(\psi)\sin(\theta) + \cos(\theta)\sin(\phi)\sin(\psi) \\ \cos(\theta)\sin(\psi) + \cos(\psi)\sin(\phi)\sin(\theta) & \cos(\phi)\cos(\psi) & \sin(\theta)\sin(\psi) - \cos(\theta)\cos(\psi)\sin(\phi) \\ -\cos(\phi)\sin(\theta) & \sin(\phi) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{pmatrix}.$$

où ϕ, θ, ψ représentent respectivement les angles autour des axes x, y, z . Par conséquent, la solution mathématique proposée utilise les vitesses linéaires et angulaires pour déterminer le gradient. Ainsi, la dérivée de d_{ij} par rapport au vecteur des vitesses angulaires est moins complexe à déterminer que la dérivée par rapport à la matrice \mathbf{Q} . En effet, la dérivée de la matrice de rotation par rapport au temps peut correspondre au vecteur des vitesses angulaires $\boldsymbol{\omega}$ selon l'équation (3-5).

Par ce fait, l'expression finale est définie selon deux étapes : la première est de dériver d_{ij} par rapport au temps afin de déterminer et d'isoler les vitesses linéaires et angulaires. La seconde étape consiste à déterminer les gradients des vitesses linéaires et angulaires à partir du résultat de la première expression de \dot{d}_{ij} . Ils sont calculés en dérivant \dot{d}_{ij} par rapport à la vitesse linéaire $\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{v}$ et angulaire $\boldsymbol{\omega}$. Toutefois, avant de dériver par rapport au temps, d_{ij}

est développé à partir de l'équation (3-7) en tenant compte cette fois-ci de la matrice de rotation \mathbf{Q} , par conséquent :

$$d_{ij}^2 = d_i^2 \boldsymbol{\rho}_i^T \boldsymbol{\rho}_i + d_j^2 \boldsymbol{\rho}_j^T \boldsymbol{\rho}_j + \mathbf{b}_{ij}^T \mathbf{b}_{ij} - 2d_i d_j \boldsymbol{\rho}_i^T \boldsymbol{\rho}_j + 2d_j \boldsymbol{\rho}_j^T \mathbf{Q} \mathbf{b}_{ij} - 2d_i \boldsymbol{\rho}_i^T \mathbf{Q} \mathbf{b}_{ij}, \quad (4-14)$$

avec : $\mathbf{b}_{ij} = \mathbf{b}_i - \mathbf{b}_j$ et $(\mathbf{Q}^T \mathbf{Q}) (\mathbf{b}_{ij}^T \mathbf{b}_{ij}) = \mathbf{b}_{ij}^T \mathbf{b}_{ij}$ puisque $\mathbf{Q}^T \mathbf{Q}$ égale à la matrice d'identité.

La dérivée par rapport au temps sur les deux côtés de l'équation (4-14), permet d'obtenir le résultat suivant :

$$\dot{d}_{ij} = \frac{\partial d_{ij}}{\partial t} = \mathbf{c}_{11}^T \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{c}_{12}^T \boldsymbol{\omega} + \mathbf{c}_{13} \frac{\partial d_i}{\partial t} + \mathbf{c}_{14} \frac{\partial d_j}{\partial t}, \quad (4-15)$$

avec :

$$\mathbf{c}_{13} = \left[\frac{d_i \boldsymbol{\rho}_i^T \boldsymbol{\rho}_i - d_j \boldsymbol{\rho}_i^T \boldsymbol{\rho}_j - \boldsymbol{\rho}_i^T \mathbf{Q} \mathbf{b}_{ij}}{d_{ij}} \right], \quad \mathbf{c}_{14} = \left[\frac{d_j \boldsymbol{\rho}_j^T \boldsymbol{\rho}_j - d_i \boldsymbol{\rho}_i^T \boldsymbol{\rho}_j + \boldsymbol{\rho}_j^T \mathbf{Q} \mathbf{b}_{ij}}{d_{ij}} \right],$$

$$\mathbf{c}_{11} = \left[\frac{d_i^2 \boldsymbol{\rho}_i - d_i d_j \boldsymbol{\rho}_j - d_i \mathbf{Q} \mathbf{b}_{ij}}{d_{ij}} \right] \left[\frac{\mathbf{p} + \mathbf{Q} \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i}{\rho_i} \right] + \left[\frac{d_j^2 \boldsymbol{\rho}_j - d_i d_j \boldsymbol{\rho}_i + d_j \mathbf{Q} \mathbf{b}_{ij}}{d_{ij}} \right] \left[\frac{\mathbf{p} + \mathbf{Q} \mathbf{b}_j - \mathbf{a}_j}{\rho_j} \right],$$

et :

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_{12} = & \left[\frac{d_i^2 \mathbf{p}_i - d_i d_j \mathbf{p}_j - d_i \mathbf{Qb}_{ij}}{d_{ij}} \right] \left[\frac{\mathbf{Qb}_i \times (\mathbf{p} - \mathbf{a}_i)}{\rho_i} \right] \\ & + \\ & \left[\frac{d_j^2 \mathbf{p}_j - d_i d_j \mathbf{p}_i + d_j \mathbf{Qb}_{ij}}{d_{ij}} \right] \left[\frac{\mathbf{Qb}_j \times (\mathbf{p} - \mathbf{a}_j)}{\rho_j} \right] + \mathbf{Qb}_{ij} \times \left(\frac{d_j \mathbf{p}_j - d_i \mathbf{p}_i}{d_{ij}} \right). \end{aligned}$$

où le symbole (\times) représente le produit vectoriel. Les expressions $\frac{\partial d_i}{\partial t}$ et $\frac{\partial d_j}{\partial t}$ sont déterminées en appliquant la dérivée par rapport au temps aux deux côtés de l'expression (3-18). Le résultat est sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial d_i}{\partial t} \\ \frac{\partial d_j}{\partial t} \end{bmatrix}_{2 \times 1} = \left[\mathbf{A} \mathbf{A}_{ij} \right]_{2 \times 2}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{11}^T \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{k}_{12}^T \boldsymbol{\omega} \\ \mathbf{k}_{21}^T \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{k}_{22}^T \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix}_{2 \times 1}. \quad (4-16)$$

Par conséquent, les dérivées par rapport au temps des coefficients sont :

$$\begin{aligned} \frac{\partial d_i}{\partial t} = \dot{d}_i &= r_{11} \left[\mathbf{k}_{11}^T \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{k}_{12}^T \boldsymbol{\omega} \right] + r_{12} \left[\mathbf{k}_{21}^T \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{k}_{22}^T \boldsymbol{\omega} \right], \\ \frac{\partial d_j}{\partial t} = \dot{d}_j &= r_{21} \left[\mathbf{k}_{11}^T \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{k}_{12}^T \boldsymbol{\omega} \right] + r_{22} \left[\mathbf{k}_{21}^T \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{k}_{22}^T \boldsymbol{\omega} \right]. \end{aligned} \quad (4-17)$$

où :

$$\left[\mathbf{A} \mathbf{A}_{ij} \right]_{2 \times 1}^{-1} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix},$$

et :

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_{11} &= \left(\mathbf{Q} \mathbf{b}_{ij} + d_j \boldsymbol{\rho}_j - 2d_i \boldsymbol{\rho}_i \right) \left[\frac{\mathbf{p} + \mathbf{Q} \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i}{\rho_i} \right] + \left(d_j \boldsymbol{\rho}_i \right) \left[\frac{\mathbf{p} + \mathbf{Q} \mathbf{b}_j - \mathbf{a}_j}{\rho_j} \right], \\ \mathbf{k}_{12} &= \left(\mathbf{Q} \mathbf{b}_{ij} + d_j \boldsymbol{\rho}_j - 2d_i \boldsymbol{\rho}_i \right) \left[\frac{\mathbf{Q} \mathbf{b}_i \times (\mathbf{p} - \mathbf{a}_i)}{\rho_i} \right] + \left(d_j \boldsymbol{\rho}_i \right) \left[\frac{\mathbf{Q} \mathbf{b}_j \times (\mathbf{p} - \mathbf{a}_j)}{\rho_j} \right] + \mathbf{Q} \mathbf{b}_{ij} \times \boldsymbol{\rho}_i, \\ \mathbf{k}_{21} &= \left(d_i \boldsymbol{\rho}_i - \mathbf{Q} \mathbf{b}_{ij} - 2d_j \boldsymbol{\rho}_j \right) \left[\frac{\mathbf{p} + \mathbf{Q} \mathbf{b}_j - \mathbf{a}_j}{\rho_j} \right] + \left(d_i \boldsymbol{\rho}_j \right) \left[\frac{\mathbf{p} + \mathbf{Q} \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i}{\rho_i} \right], \\ \mathbf{k}_{22} &= \left(d_i \boldsymbol{\rho}_i - \mathbf{Q} \mathbf{b}_{ij} - 2d_j \boldsymbol{\rho}_j \right) \left[\frac{\mathbf{Q} \mathbf{b}_j \times (\mathbf{p} - \mathbf{a}_j)}{\rho_j} \right] + \left(d_i \boldsymbol{\rho}_j \right) \left[\frac{\mathbf{Q} \mathbf{b}_i \times (\mathbf{p} - \mathbf{a}_i)}{\rho_i} \right] + \mathbf{Q} \mathbf{b}_{ij} \times \boldsymbol{\rho}_j. \end{aligned}$$

En remplaçant (4-17) dans (4-15) et en isolant les vecteurs des vitesses linéaires et angulaires,

on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{d}_{ij} &= \left[\mathbf{c}_{11} + \mathbf{c}_{13} (r_{11} \mathbf{k}_{11} + r_{12} \mathbf{k}_{21}) + \mathbf{c}_{14} (r_{21} \mathbf{k}_{11} + r_{22} \mathbf{k}_{21}) \right]^T \dot{\mathbf{p}} \\ &+ \\ &\left[\mathbf{c}_{12} + \mathbf{c}_{13} (r_{11} \mathbf{k}_{12} + r_{12} \mathbf{k}_{22}) + \mathbf{c}_{14} (r_{21} \mathbf{k}_{12} + r_{22} \mathbf{k}_{22}) \right]^T \boldsymbol{\omega}. \end{aligned} \tag{4-18}$$

À partir de l'équation (4-18), les gradients linéaire et angulaire sont déterminés en dérivant respectivement par rapport à $\dot{\mathbf{p}}$ et $\dot{\boldsymbol{\omega}}$. Par ce fait, le résultat est :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{d}_{ij}}{\partial \dot{\mathbf{p}}} \\ \frac{\partial \dot{d}_{ij}}{\partial \dot{\boldsymbol{\omega}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_{11} + \mathbf{c}_{13}(r_{11}\mathbf{k}_{11} + r_{12}\mathbf{k}_{21}) + \mathbf{c}_{14}(r_{21}\mathbf{k}_{11} + r_{22}\mathbf{k}_{21}) \\ \mathbf{c}_{12} + \mathbf{c}_{13}(r_{11}\mathbf{k}_{12} + r_{12}\mathbf{k}_{22}) + \mathbf{c}_{14}(r_{21}\mathbf{k}_{12} + r_{22}\mathbf{k}_{22}) \end{bmatrix}, \quad (4-19)$$

Comme précédemment, le vecteur unitaire est défini en divisant le vecteur gradient par sa norme comme suit :

$$\nabla \mathbf{W}_{ij} = \frac{\begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{d}_{ij}}{\partial \dot{\mathbf{p}}} \\ \frac{\partial \dot{d}_{ij}}{\partial \dot{\boldsymbol{\omega}}} \end{bmatrix}}{\left\| \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{d}_{ij}}{\partial \dot{\mathbf{p}}} \\ \frac{\partial \dot{d}_{ij}}{\partial \dot{\boldsymbol{\omega}}} \end{bmatrix} \right\|}. \quad (4-20)$$

Les deux méthodes de calcul permettent de définir un gradient pour les translations uniquement dans le cas de la première méthode, ainsi qu'un gradient de translation et de rotation pour la seconde méthode. Ces deux calculs aboutissent au même résultat puisque d_{ij} est dérivé par rapport à \mathbf{p} et à $\dot{\mathbf{p}}$ dans la première et la deuxième méthode respectivement.

En effet :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \dot{d}_{ij}}{\partial \dot{\mathbf{p}}} &= \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{p}}} \left(\frac{\partial d_{ij}}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{p}}} \left(\frac{\partial d_{ij}}{\partial \mathbf{p}} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} + \frac{\partial d_{ij}}{\partial \mathbf{Q}} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} \right) \\
 &= \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{p}}} \left(\frac{\partial d_{ij}}{\partial \mathbf{p}} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{p}}} \left(\frac{\partial d_{ij}}{\partial \mathbf{p}} \dot{\mathbf{p}} \right) \\
 &= \frac{\partial d_{ij}}{\partial \mathbf{p}},
 \end{aligned}$$

et :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \dot{d}_{ij}}{\partial \dot{\mathbf{Q}}} &= \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{Q}}} \left(\frac{\partial d_{ij}}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{Q}}} \left(\frac{\partial d_{ij}}{\partial \mathbf{p}} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} + \frac{\partial d_{ij}}{\partial \mathbf{Q}} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} \right) \\
 &= \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{Q}}} \left(\frac{\partial d_{ij}}{\partial \mathbf{Q}} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{Q}}} \left(\frac{\partial d_{ij}}{\partial \mathbf{Q}} \dot{\mathbf{Q}} \right) \\
 &= \frac{\partial d_{ij}}{\partial \mathbf{Q}}.
 \end{aligned}$$

Il est à noter que $\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{v} = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t}$, $\dot{\mathbf{Q}} = \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t}$ et $\frac{\partial d_{ij}}{\partial t} = \dot{d}_{ij}$. La dérivée de $\frac{\partial d_{ij}}{\partial t}$ dépendant des deux paramètres \mathbf{p} et \mathbf{Q} puisqu'ils sont variables dans le temps. Par ce fait, en appliquant la dérivée partielle, on obtient :

$$\frac{\partial d_{ij}}{\partial t} = \frac{\partial d_{ij}}{\partial \mathbf{p}} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} + \frac{\partial d_{ij}}{\partial \mathbf{Q}} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t}.$$

Après avoir déterminé la direction du vecteur, la prochaine section consiste à déterminer l'amplitude de la force.

4.3.3 Calcul de l'intensité de la force et du torseur au point d'interférence

Afin d'éviter de créer une situation inconfortable pour l'utilisateur, il est nécessaire d'adapter graduellement l'intensité de la force. En effet, cette intensité pourrait augmenter ou diminuer progressivement par rapport à la distance des câbles en interférences, elle diminue graduellement à mesure que la distance entre les câbles augmente. Par ailleurs, cette intensité de force pourrait être générée par un modèle de ressort haptique (ou un modèle plus complexe), mais les deux câbles pourraient se croiser ou se plier puisque ce modèle fonctionne avec une pénétration dans le plan d'interférence, ce qui devrait être évité. Dans ce cas, une fonction logistique est suggérée pour générer cette progression comme, par exemple :

$$\alpha_{ij} = \frac{F_u}{1 + \exp \left[-b \left(d_{ij} - \frac{d_u + d_l}{2} \right) \right]}, \quad (4-21)$$

où : F_u correspond à la force maximale générée; d_u et d_l sont respectivement les distances maximales et minimales admissibles; b est un paramètre agissant sur la pente de la courbe. Il est calculé à partir des distances d_u et d_l ainsi que les conditions où ces dernières sont représentées comme suit :

$$\begin{cases} f(d_{ij}) = F_u - \varepsilon & 0 \leq d_{ij} \leq d_l \\ f(d_{ij}) = \varepsilon & d_{ij} \geq d_u \end{cases} \text{ lorsque : } \quad (4-22)$$

avec ε qui représente la variation admissible de la fonction. À partir des conditions formulées dans (4-22) et de l'équation (4-21) on obtient :

$$b = \frac{2 \ln \left[\frac{F_u - \varepsilon}{\varepsilon} \right]}{d_l - d_u}, \quad (4-23)$$

Selon le cas, à savoir vecteur ou torseur d'interférence, la direction et l'intensité de la force ou du torseur sont déterminées. Le torseur \mathbf{W}_{ij} ou la force \mathbf{F}_{ij} sont calculés selon la méthode de calcul du gradient utilisé à partir des équations suivantes :

$$\mathbf{W}_{ij} = \alpha_{ij} \nabla \mathbf{W}_{ij}, \quad (4-24)$$

ou :

$$\mathbf{F}_{ij} = \alpha_{ij} \nabla \mathbf{F}_{ij}, \quad (4-25)$$

avec α_{ij} correspond à l'intensité de la force calculée de l'équation (4-21), $\nabla \mathbf{W}_{ij}$ est le gradient déterminé à partir de (4-20) et $\nabla \mathbf{F}_{ij}$ est le gradient déterminé à partir de (4-13).

Toutefois, dans le cas où plusieurs câbles sont en interférence, la force \mathbf{F}_{int} est déterminée selon la résultante des torseurs \mathbf{W}_{ij} de chaque paire de câbles comme suit :

$$\mathbf{F}_{\text{int}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=j+1}^m \mathbf{W}_{ij}, \quad (4-26)$$

ou dans le cas du vecteur d'interférence :

$$\mathbf{F}_{\text{int}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=j+1}^m \mathbf{F}_{ij}, \quad (4-27)$$

Il est à noter que l'intensité de la force \mathbf{F}_{int} est limitée à la force maximale prédéfinie dans (3-24). Le bloc de gestion des interférences est exécuté dans un algorithme en temps réel présenté dans la section suivante.

4.3.4 Algorithme de gestion des interférences

La figure 4-3 illustre la mise en œuvre en temps réel de la stratégie adoptée. Tout d'abord, les distances entre chaque paire de câbles sont calculées à partir de l'algorithme présenté à la figure 3-7. Ensuite, les distances sont vérifiées selon la distance maximale admissible d_u . Si elle est inférieure à cette dernière, l'intensité de la force α_{ij} est calculée selon les conditions définies dans 4.3.3, puis le gradient est déterminé selon l'une des approches proposées.

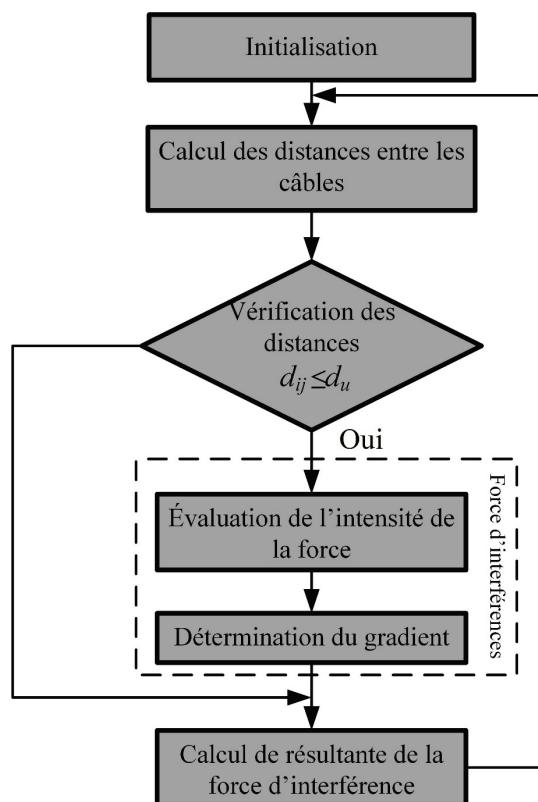


Figure 4-3 : Algorithme temps réel pour la gestion des interférences

La stratégie de commande est mise en œuvre et validée en premier lieu à travers des simulations. La deuxième méthode de calcul de direction du vecteur, à savoir le gradient de translation et de rotation, est appliquée dans cette première validation. En second lieu, le calcul du gradient de translation uniquement (première méthode) est utilisé dans la stratégie de commande et validé à travers des expérimentations sur le mécanisme parallèle entraîné par sept câbles introduit à la section 3.2. Les paragraphes suivants présentent les différents résultats obtenus.

4.4 Validation de la stratégie de la gestion des interférences

Compte tenu du mécanisme réel, illustré à la figure 4-4 , une distance minimale est requise afin d'éviter le croisement des câbles. Cette distance doit prendre en considération le diamètre des câbles, la dimension des limiteurs de tensions et les possibles erreurs de modélisation. Le graphe à la figure 4-5 illustre un exemple de fonction logistique utilisée pour déterminer l'intensité selon la distance entre les câbles. Puisqu'il faut prendre en considération certains éléments, le choix s'est porté sur une distance minimale admissible qui est égale à $d_l = 5 \text{ cm}$. La force maximale ainsi que la variation sont égales respectivement à $F_u = 2 \text{ N}$ et $\varepsilon = 0.1$.

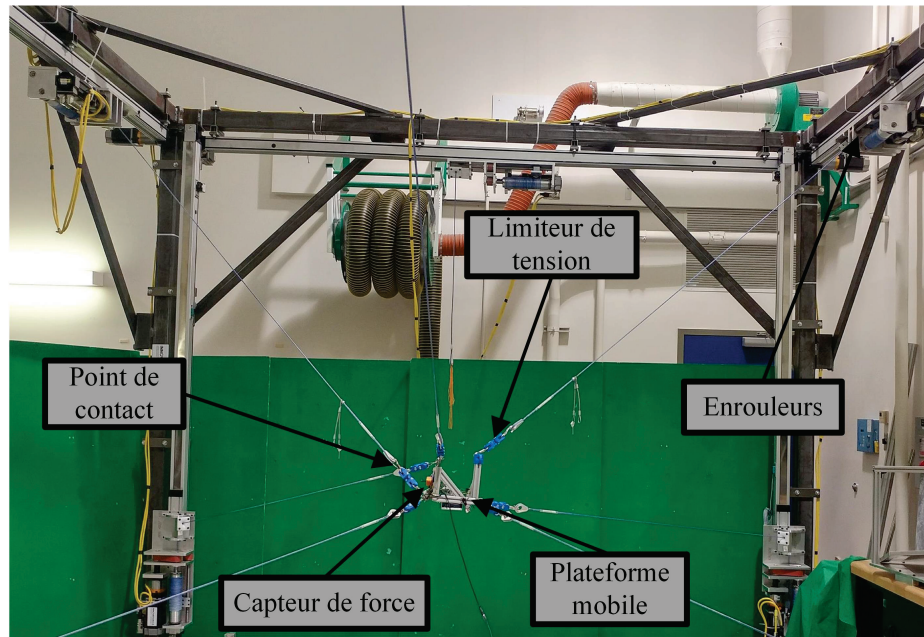


Figure 4-4 : Illustration du mécanisme avec deux câbles inversés

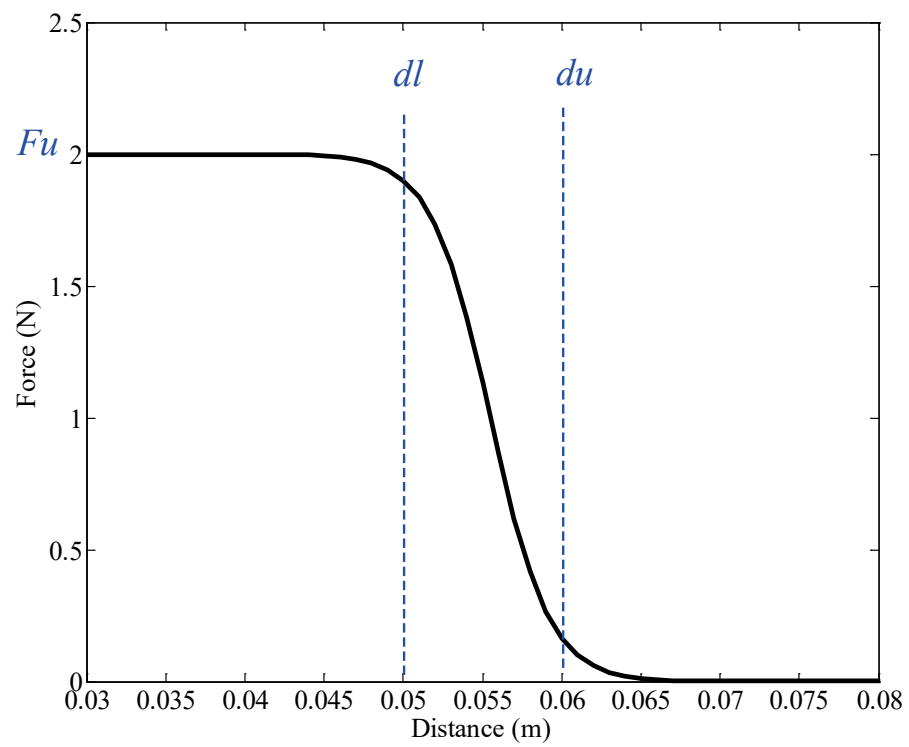


Figure 4-5 : Exemple de fonction logistique avec une force maximale

La distance maximale admissible est égale à $d_u = 6.1$ cm où cette dernière est sélectionnée en fonction de la forme géométrique de plateforme mobile. Cette distance a été choisie suffisamment courte pour générer le plus de situation d'interférences de manière à obtenir des déplacements suffisamment contraints par la force calculée. Il est à noter que l'effecteur est un cube planaire à six faces où les câbles sont supposés s'éviter. Par ce fait, afin de provoquer des interférences et ainsi évaluer expérimentalement la stratégie de commande, quelques câbles ont été inversés au niveau des points d'attache de la plateforme mobile, et les paramètres de la fonction logistique sont sélectionnés pour chaque expériences. Par ailleurs, pour toutes les simulations et les expérimentations, la masse et l'amortissement virtuel de la commande en admittance sont fixes et ont la même valeur de 6.25 (kg, Ns/m). Les unités sont en mètres pour la position et en radians pour les orientations. Cette section présente le déroulement et les résultats obtenus lors des simulations et des expérimentations sur le mécanisme.

4.4.1 Simulations basées sur le calcul du torseur

Afin de simuler le comportement réel et la dynamique du MPEC, les différents modèles mathématiques ainsi que l'algorithme de gestion des interférences sont mis en œuvre dans Matlab-Simulink. La stratégie de commande programmée est basée sur le calcul du gradient qui comprend la translation et la rotation. Après la détermination du gradient et du torseur d'interférence respectivement à partir des équations (4-20) et (4-26), la résultante est

calculée selon l'équation (4-7). Les données appliquées pour les simulations sont récupérées à partir d'un capteur réel où des forces sont appliquées dans les différentes directions. En principe, pour simuler des déplacements en translation et en rotation, un capteur d'effort devrait être utilisé afin d'enregistrer des forces et des moments. Ensuite, ces données seront converties en des vitesses linéaires et angulaires à travers le modèle d'admittance illustrée à l'équation (4-6). Toutefois, ayant uniquement un capteur de force qui permet des déplacements linéaires, les moments sont simulés en remplaçant ces déplacements linéaires par des rotations. En effet, chaque déplacement linéaire sur un axe correspond à une rotation sur le même axe. Par exemple, si une force en x est appliquée, cette dernière correspondra à un moment sur ce même axe. Par ce fait, un capteur de force de l'entreprise Variense [117] (FSE103) est utilisé à travers une connexion filaire où les données sont récupérées et converties en des moments pour simuler des rotations. Par ailleurs, dans ces simulations le terme effort correspond à un vecteur de données de six dimensions contenant des forces et des moments. Il est à noter que les paramètres de fonction logistique sont représentés à figure 4-5 pour les trois simulations.

Dans la première simulation, aucune force et aucun moment n'est appliqué sur le capteur d'effort, et les câbles (1,3) sont inversés afin de provoquer des interférences puisque l'effecteur est conçu de manière à les éviter. En d'autres termes, le repère de base du premier enrouleur \mathbf{a}_1 de la structure est attaché au point \mathbf{b}_3 de la plateforme mobile, et celui de \mathbf{a}_3 à \mathbf{b}_1 . Dans la deuxième simulation, uniquement des moments sont utilisés et les câbles (1,3)

sont aussi inversés. Il est à noter que l'intervalle de rotation est limité entre $[-1.57, 1.57]$ radian ou de $[-90^\circ, 90^\circ]$ pour éviter des collisions entre les câbles et la plateforme mobile. Dans la dernière simulation, des efforts (forces et moments) sont appliqués et les câbles (1,3) et (5,7) sont inversés. Les résultats sont discutés à la section suivante.

4.4.1.3 Analyse des résultats

Au début de la première simulation, la plateforme mobile est positionnée à une pose égale à $[1.77 \ 3.65 \ 1.22 \ 0 \ 0 \ -0.35]^T$. À cette pose, la distance entre la paire de câble (1,3) est égale à 4.75 cm. Puisque cette distance est inférieure à la distance minimale admissible d_l , le MPEC se déplace selon le torseur d'interférence pour augmenter l'écart entre les câbles (1,3). La figure 4-6 démontre que la direction du gradient calculé pour le torseur d'interférence permet d'augmenter cette distance jusqu'à atteindre la distance maximale admissible d_u . La figure 4-7 illustre les efforts agissant sur la plateforme mobile durant une période de temps. On constate que l'effort résultant égale uniquement au torseur d'interférence puisqu'aucune force et aucun moment ne sont appliqués dans cette simulation. En outre, l'intensité du torseur d'interférence diminue progressivement au cours du temps en fonction de l'augmentation de la distance entre les deux câbles (1,3). La figure 4-8 présente la position et l'orientation du mécanisme suivi tout au long de cette simulation.

Au début de la deuxième simulation, la position est égale à 1.56 m en x , 3.24 m en y , 1.22 m en z et l'orientation à 0 rad pour la composante $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$. L'écart entre les câbles (1,3) est de 6.1 cm à la pose initiale du MPEC. Cette distance est supérieure à la distance maximale admissible, par ce fait, le torseur d'interférence n'est pas calculé et il est égale à zéro.

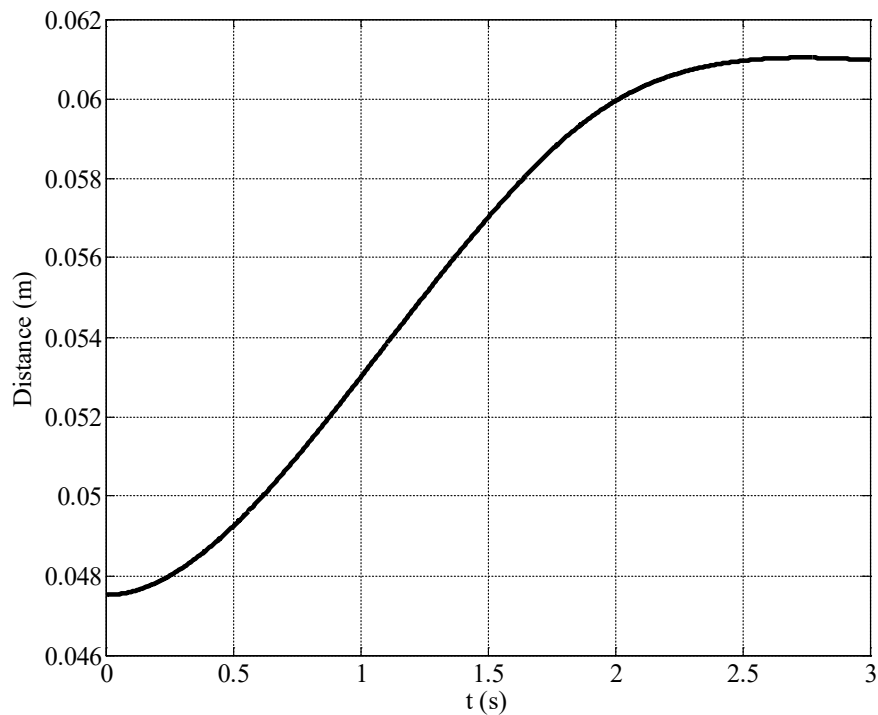


Figure 4-6 : Évolution de la distance entre les câbles (1,3) pendant la première simulation

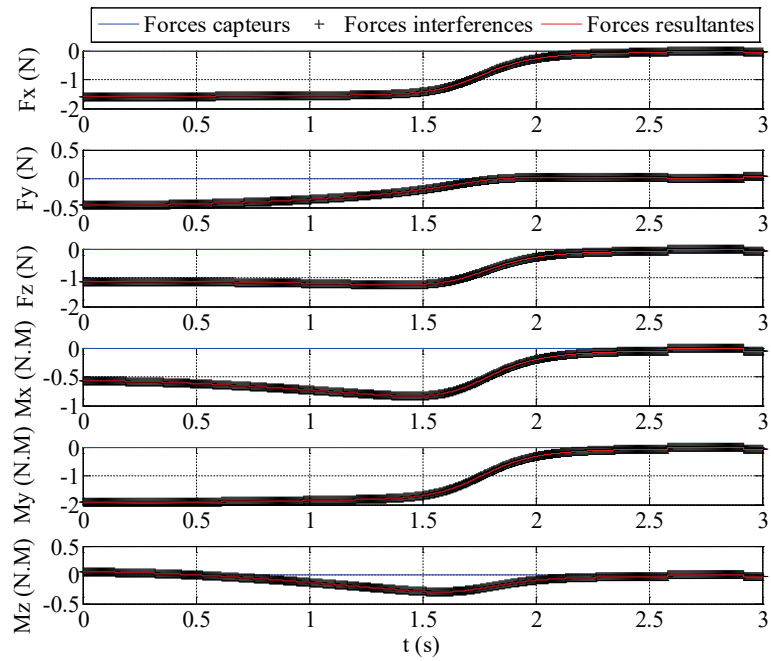


Figure 4-7 : Forces et moments appliqués pendant la première simulation

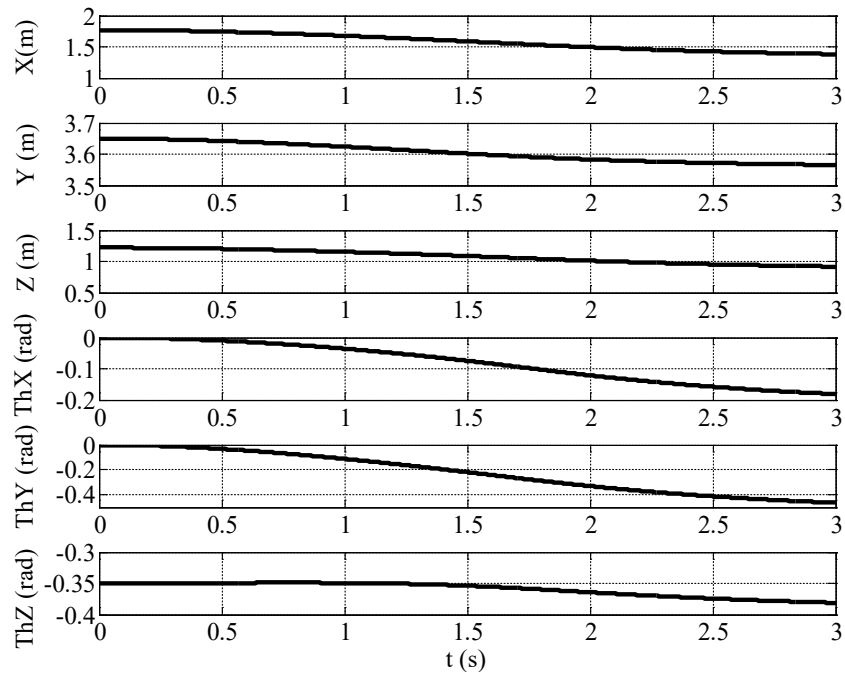
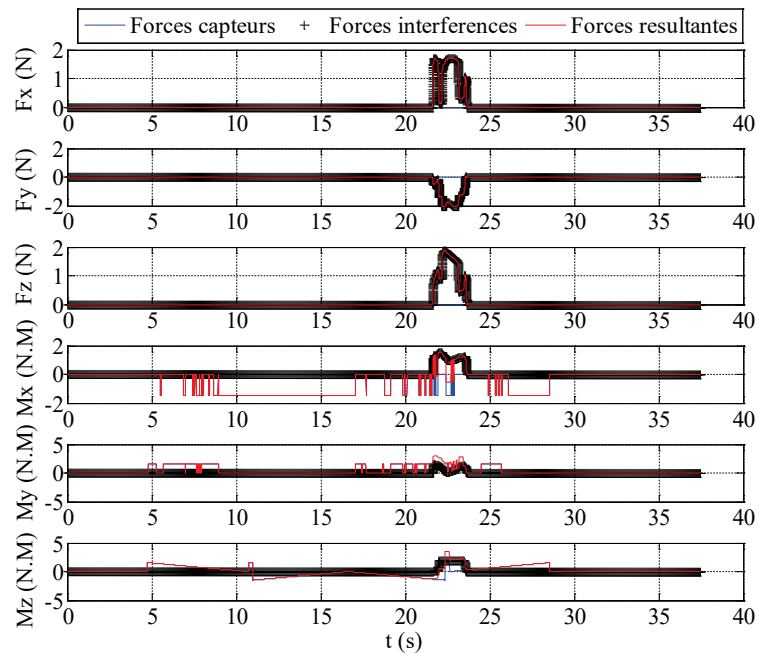
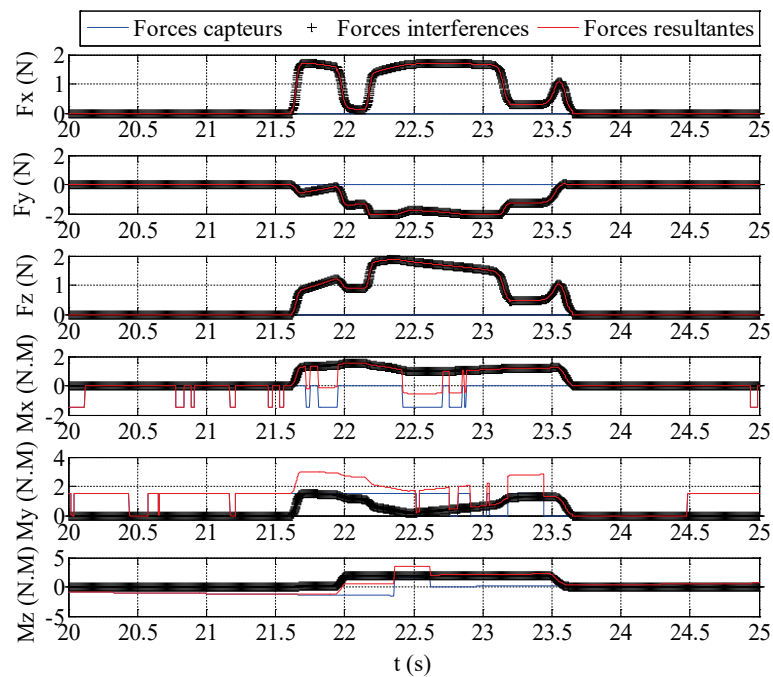


Figure 4-8 : Trajectoire cartésienne parcourue durant la première simulation

La figure 4-9 illustre les efforts (forces et moments) agissant sur la plateforme mobile durant cette deuxième simulation. L'image (b) représente un élargissement de l'image (a) compris entre un intervalle de temps de 20 à 25 secondes. On constate que le torseur d'interférence, qui est représenté en couleur noire, est généré pour la première fois à 21.62 s où à cet instant la distance entre les câbles 3 et 4 est égale à 6 cm. Par ce fait, les gradients de translation et de rotation sont calculés à ce moment pour augmenter cette distance. La figure 4-10 illustre le mécanisme à cet instant avec deux images identiques prises à des vues différentes. Les deux câbles 3 et 4 sont représentés en couleur rouge dans ces deux images.

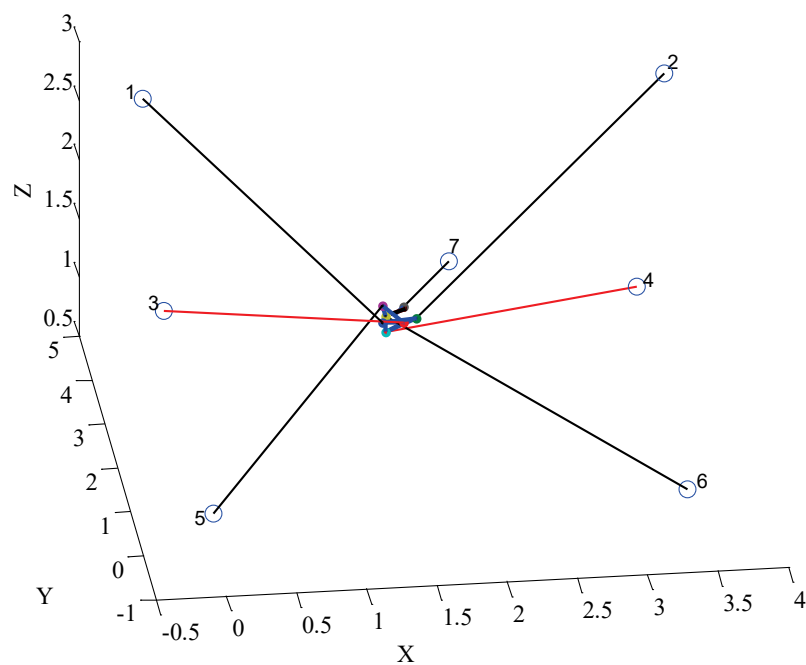


(a) Forces agissant sur la plateforme mobile pour toute la durée de la simulation

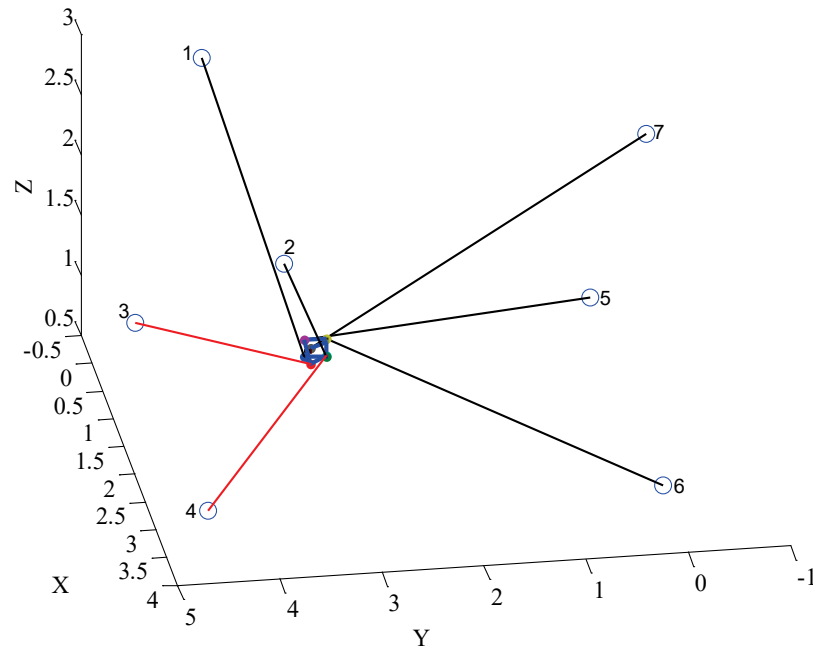


(b) Forces agissant sur la plateforme mobile durant une période de temps

Figure 4-9 : Forces et moments appliqués pendant la deuxième simulation



(a) Vue de face du MPEC à $t = 21.62$ s



(b) Vue de côté du MPEC à $t = 21.62$ s

Figure 4-10 : Représentation du mécanisme lors de la deuxième simulation

La position et l'orientation lors de la deuxième simulation sont présentées à la figure 4-11. On constate qu'à 21.62 s, le mécanisme se déplace selon la direction du vecteur résultant où il est calculé à partir du torseur d'interférence et de l'effort appliqué. Toutefois, il est à noter que le vecteur de données appliquées dans cette simulation est constitué que de moments. Par ce fait, les translations sont générées par le calcul du gradient où elles sont converties par la suite à des vitesses puis à des positions.

Le vecteur de données de la dernière simulation est constitué de forces et de moments et les câbles (1,3) et (5,7) sont inversés. Le MPEC est positionné à 1.56 m en x , 3.24 m en y , 1.22 m en z avec une orientation égale à 0 rad pour les trois composantes. Les distances entre

les paires de câbles (1,3) et (5,7) sont égales respectivement à 6.1 cm et 6.3 cm. À 15.19 s l'écart entre ces deux couples est de 4.3 cm pour les câbles (1,3) ainsi que 9.8 cm pour les câbles (5,7). Par conséquent, la distance entre la paire (1,3) n'est pas respectée et le torseur d'interférence est calculé afin d'éviter le croisement des deux câbles.

L'image (a) de la figure 4-12 illustre les efforts opérant sur la plateforme mobile et l'image (b) représente un élargissement de cette figure. Par ailleurs, deux images à des vues différentes du mécanisme sont représentées à la figure 4-13 à l'instant 15.9 s et la figure 4-14 montre la pose lors de la troisième simulation.

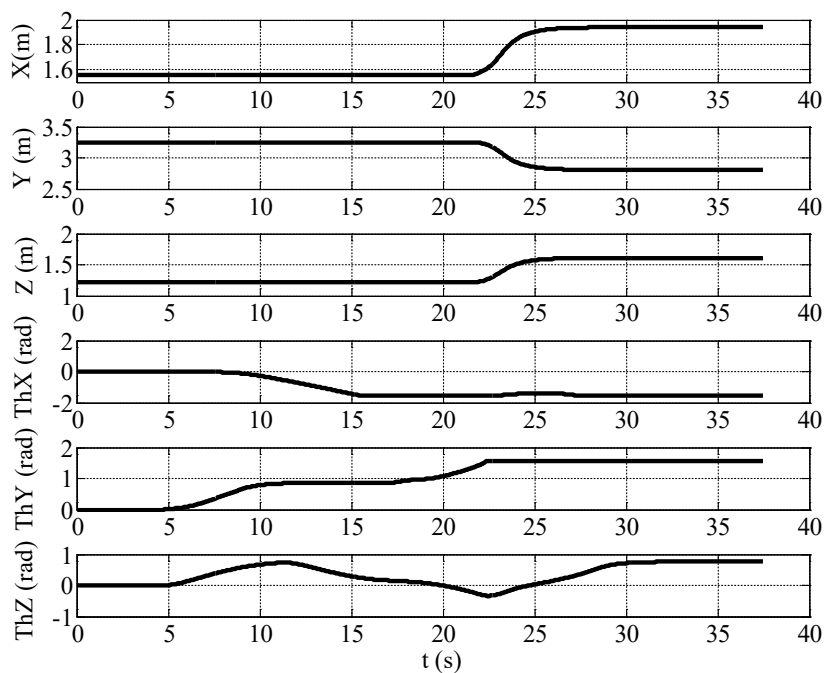
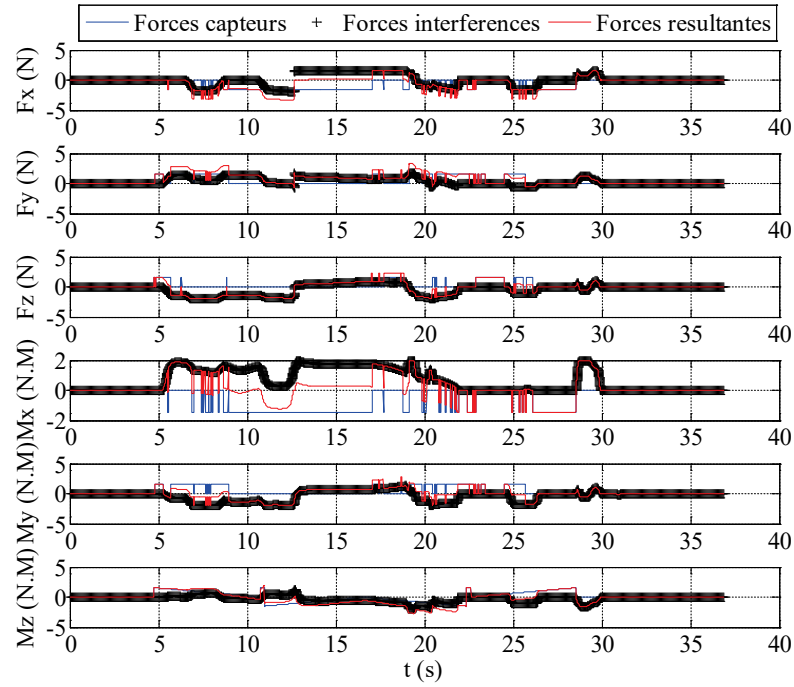
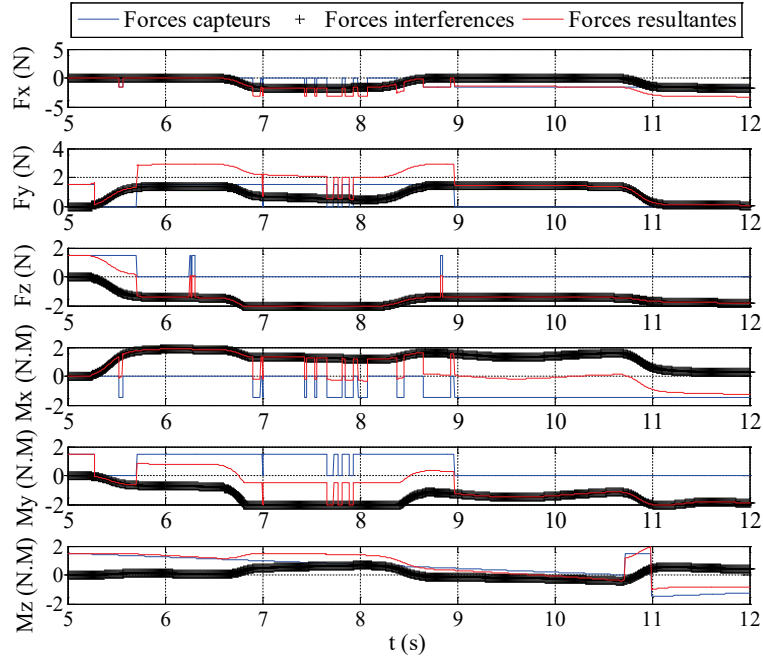


Figure 4-11 : Trajectoire cartésienne parcourue durant la deuxième simulation

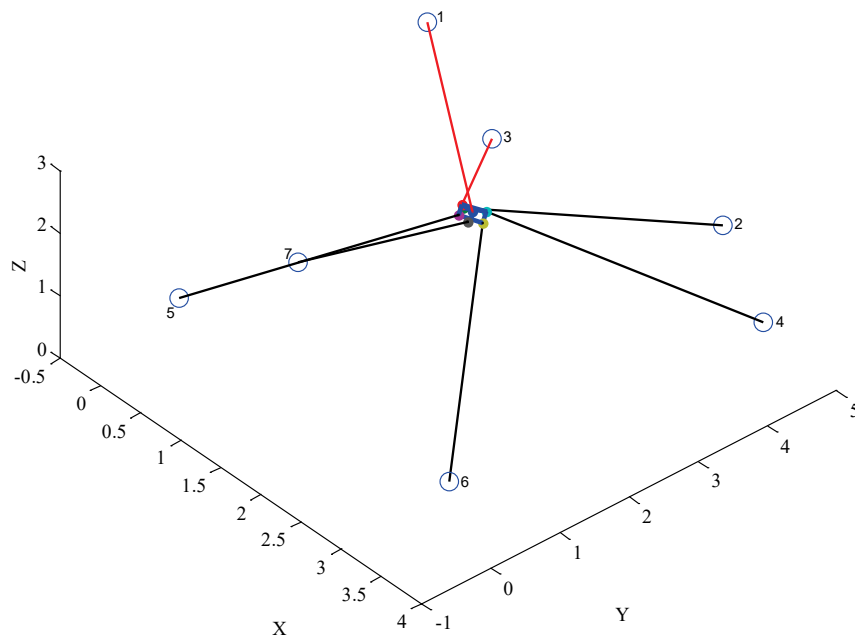


(a) Forces agissant sur la plateforme mobile pour toute la durée de la simulation

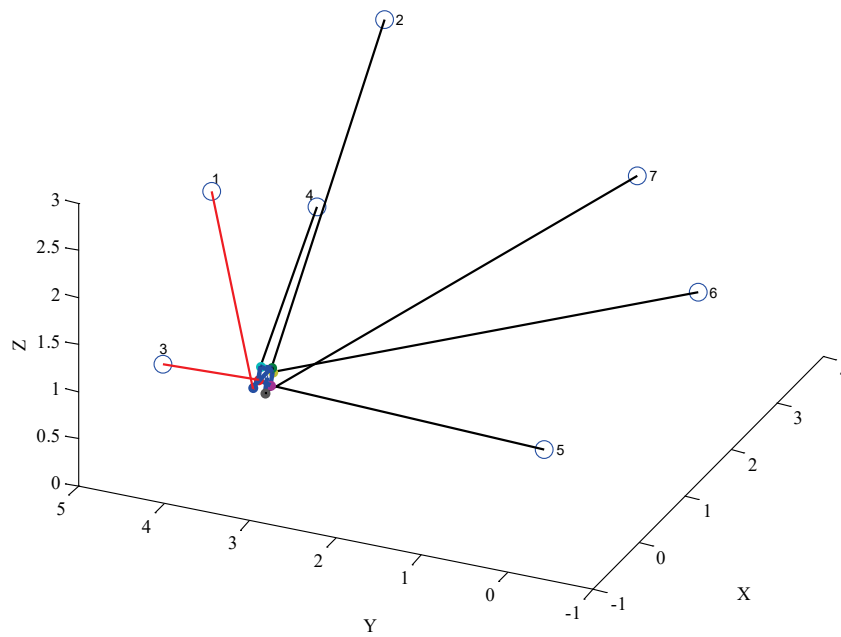


(b) Forces agissant sur la plateforme mobile durant une période de temps

Figure 4-12 : Forces et moments appliqués pendant la troisième simulation



(a) Vue de face du MPEC à $t = 15.9$ s



(b) Vue de côté du MPEC à $t = 15.9$ s

Figure 4-13 : Représentation du mécanisme lors de la troisième simulation

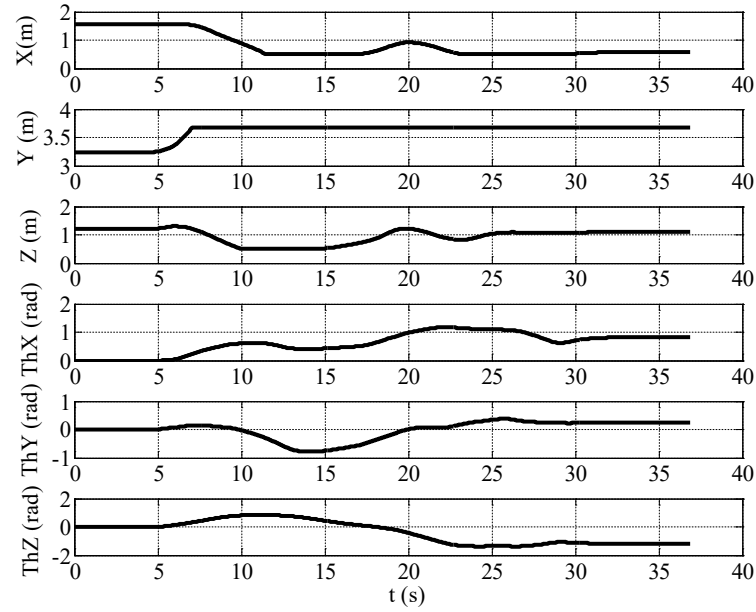


Figure 4-14 : Trajectoire cartésienne parcourue durant la troisième simulation

Il est à noter que le temps d'exécution est court dans les simulations et ne correspond pas à la réalité de déplacement du MPEC. En effet, les contraintes physiques comme les frottements n'ont pas été représentées dans les simulations ainsi que le temps de communication entre les moteurs et les différentes unités (nœud de calcul, puissance). Le comportement réel du mécanisme est illustré à la section suivante à travers des expériences pratiquées pour valider le calcul du gradient translation uniquement.

4.4.2 Expérimentations basées sur le calcul du vecteur de force

Les expérimentations de la stratégie ainsi que les différentes méthodes ont été réalisées sur le mécanisme à sept câbles présentés à la figure 4-4. Les différents algorithmes ainsi que la commande en admittance ont été mis en œuvre sur Matlab- Simulink et compilés avec RT-LAB afin de les exécuter en temps réel. Le gradient et la force d'interférence sont déterminés respectivement à partir des équations (4-10), (4-12) et (4-27). La résultante est calculée selon l'équation (4-7).

La stratégie de gestion des interférences est, en premier lieu, validée sans interaction physique et avec une seule interférence entre les câbles (1,3). Cette première expérience permet de confirmer le calcul de la force d'interférence ainsi que la stratégie de commande. En second lieu, l'expérimentation se déroule en interaction physique entre l'opérateur et le mécanisme en utilisant le capteur de force introduit à la section précédente [117] pour le déplacement du mécanisme. Ce capteur est capable de détecter des forces allant jusqu'à 100 N dans la direction verticale (axe de la poignée) et jusqu'à 80 N dans les directions transversales. Un filtre moyenne glissante est appliqué afin d'éliminer les fluctuations temporaires et d'atténuer les pics transitoires dans les signaux. Il est à noter que la fréquence de fonctionnement est de 500 Hz. En outre, l'interférence se produit aussi entre les câbles (1,3) dans cette deuxième expérience. L'expérience finale consiste en une interaction physique avec deux interférences qui sont les câbles (1,3) et (5,7). Les résultats sont discutés à la section suivante.

4.4.2.4 Analyse des résultats

Dans la première expérience, les paramètres de fonction logistique sont représentés à figure 4-5. La plateforme mobile du mécanisme est située à une position cartésienne correspondant à 1.77 m en x , 3.65 m en y et 1.22 m en z . La distance entre les câbles (1,3) est égale à 5.7 cm au départ. La figure 4-15 illustre le mécanisme au point initial avec la paire de câbles (1,3) (couleur rouge) en interférence.

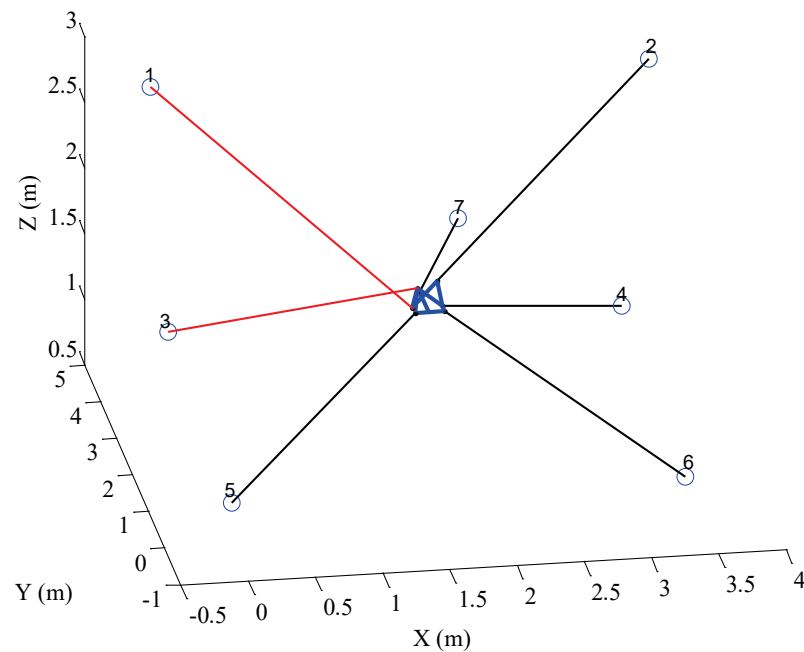


Figure 4-15 : Illustration de la première expérience au point de départ

Puisque l'opérateur ne manipule pas le mécanisme, la force résultante est égale uniquement à la force d'interférence. Après avoir activé la stratégie de commande, le

mécanisme est soumis à des déplacements suivant le sens du gradient. Une fois la distance minimale respectée, la force d'interférence est égale à zéro. La figure 4-16 démontre que les déplacements produits augmentent la distance entre les deux câbles.

Le graphe des différentes forces du système pour le déplacement enregistré est représenté par la figure 4-17. On constate qu'au début de l'expérimentation l'intensité de la force produite est maximale. Cette dernière diminue progressivement au cours du temps selon la distance entre les deux câbles. Les données manquantes dans les signaux correspondent au temps d'écriture sur le tampon à chaque 1000 échantillons. Ce paramètre définit le nombre d'échantillons récupérées lors de l'acquisition en temps réel à travers la fonction « OpWriteFile » utiliser dans Simulink-RT-Lab.

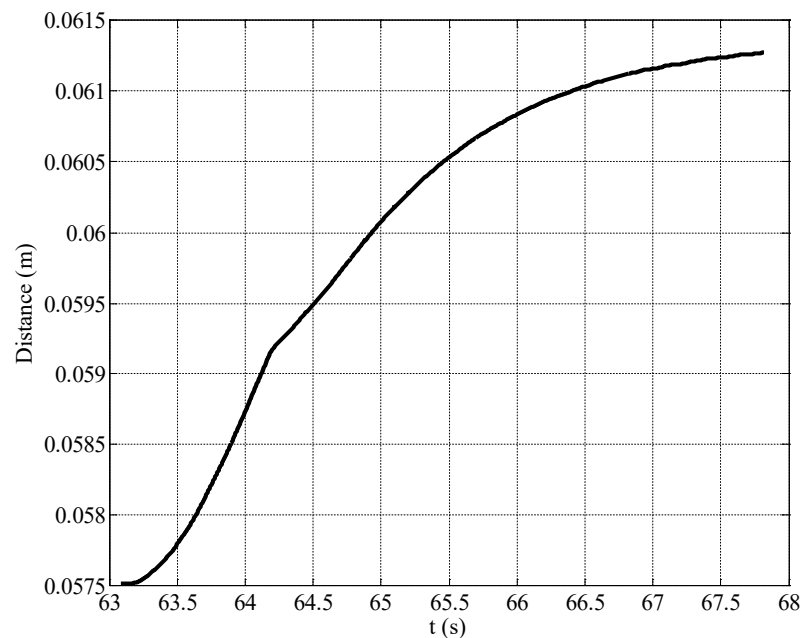


Figure 4-16 : Évolution de la distance entre les câbles (1,3) pendant la première expérience

Au point initial de la seconde expérience, la plateforme mobile est positionnée à 1.56 m en x , 3.24 m en y et 1.22 m en z . La distance entre les câbles (1,3) est de 6.1 cm. Par conséquent, la force résultante est égale à la force appliquée au capteur. L'opérateur déplace le mécanisme dans l'espace de travail et les données provenant du capteur sont traduites à travers la commande en admittance présentée précédemment. Dès que la distance minimale n'est plus considérée, une force d'interférence est produite et s'ajoute aux données du capteur. Dans cette expérimentation, les distances minimale et maximale admissibles sont de l'ordre de 6 cm et de 6.2 cm et la force $F_u = 3$ N.

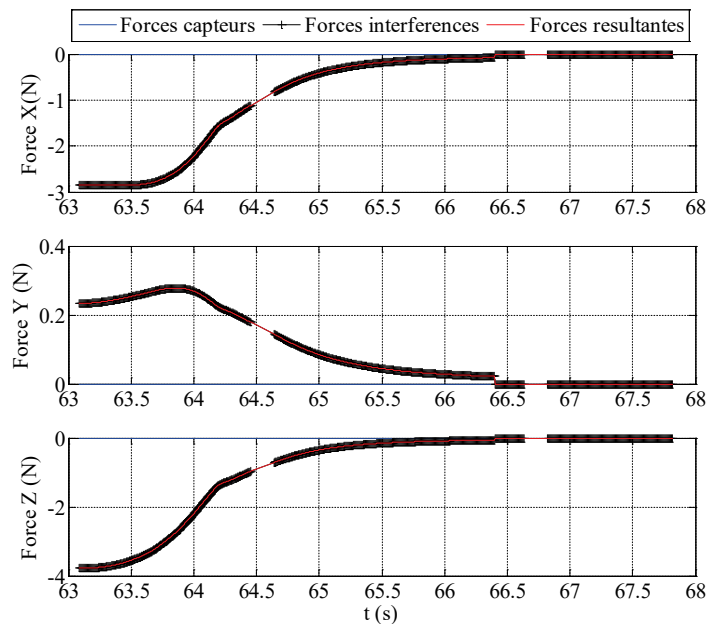
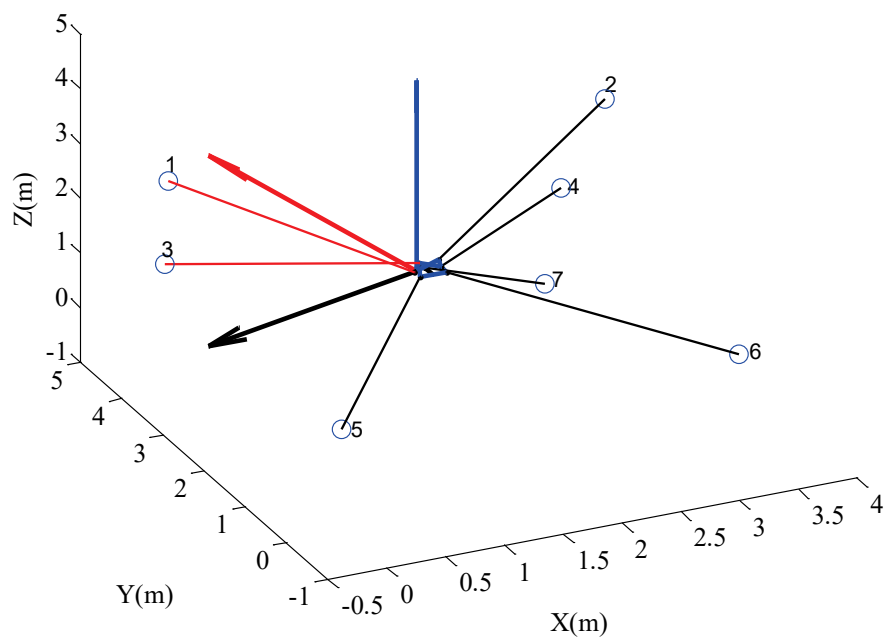
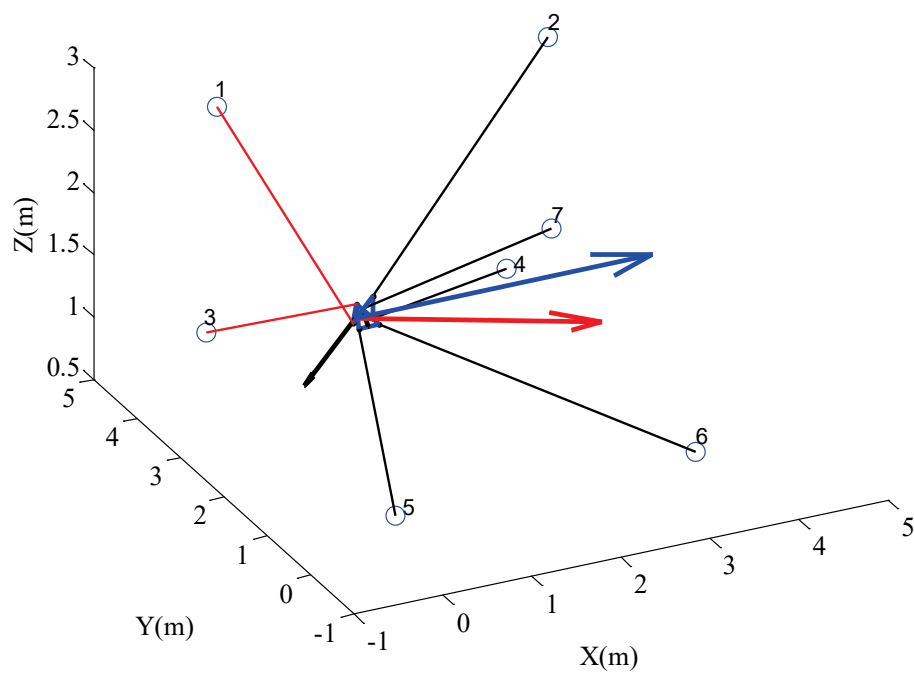


Figure 4-17 : Forces appliquées sur le mécanisme pendant la première expérience

La figure 4-18 illustre deux différentes images en interaction physique. Ces deux images ont été enregistrées à des moments et des positions différentes lors de l'expérience.



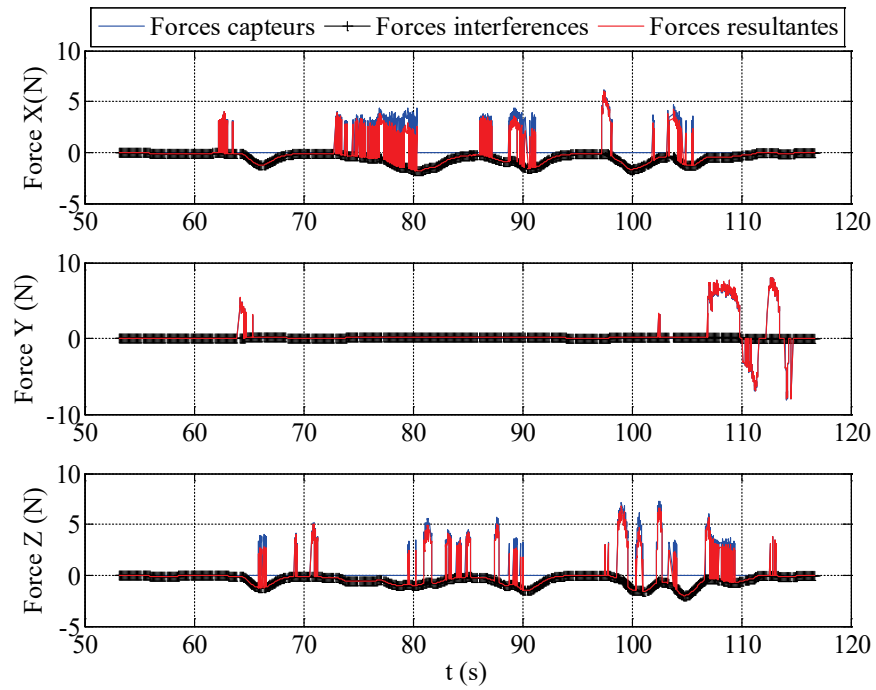
(a) Image instantanée du mécanisme à $t = 76.86$ s



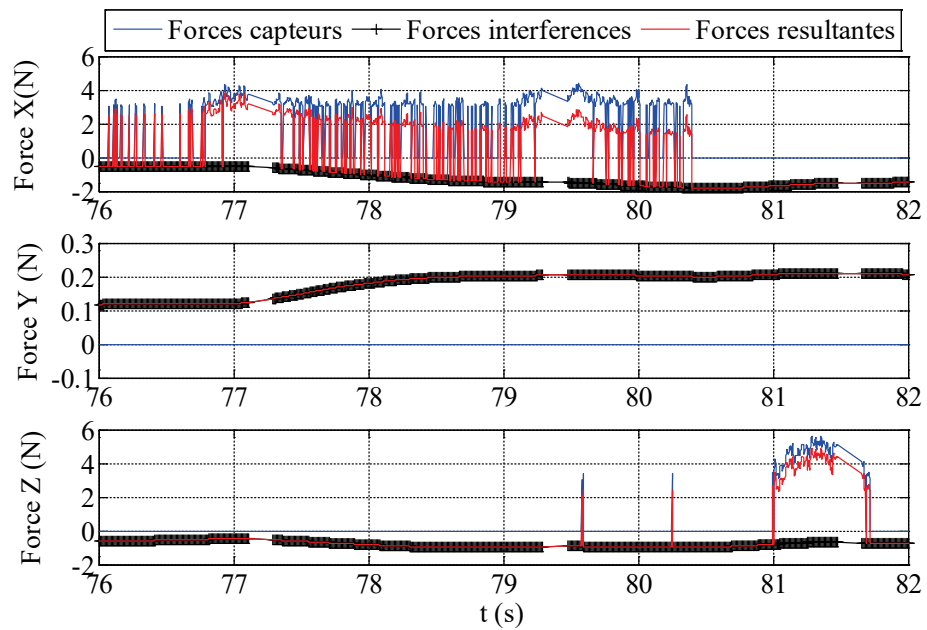
(b) Image instantanée du mécanisme à $t = 81.28$ s

Figure 4-18 : Illustration de la deuxième expérience avec une interférence

Les trois vecteurs disposés sur la plateforme mobile avec les couleurs bleu, noir et rouge correspondent respectivement aux forces de capteur (appliquées par l'opérateur), d'interférence et de la résultante. L'image (a) correspond à une position de 1.87 m en x , 3.6797 m en y et 0.53 m en z . La distance entre les deux câbles (1,3), égale à 5.9 cm, est inférieure à la distance minimale permise, par ce fait, l'intensité de la force d'interférence est maximale. Par contre, dans l'image (b) la position du MPEC ainsi que la distance entre les deux câbles sont respectivement de 1.3 m en x , 3.68 m en y , 1.05 m en z et de 6 cm. On constate que l'intensité de la force d'interférence, qui est représentée par la longueur du vecteur, est moins importante que celle de l'image (a) puisque la distance entre les deux câbles est bornée entre la distance minimale et maximale permise. La figure 4-19 (a) présente les trois forces appliquées sur le mécanisme tout au long de l'expérimentation. Un élargissement de l'image est illustré à la figure 4-19 (b) où des variations dans les signaux sont observées. Elles correspondent à des changements de sens de déplacement (va-et-vient) produit par l'opérateur afin de tester la réaction du MPEC et de l'approche de gestion des interférences. On constate que le calcul de la force d'interférence a suivi ces changements de déplacements spontanés. Ainsi, l'utilisateur ressent une force virtuelle qui le dirige vers la position voulue sans provoquer de croisement des câbles. Différentes mesures de la force d'interférence sont illustrées à la figure 4-20. Dans cet exemple, l'intensité de la force est représentée par la longueur du vecteur avec une gradation de couleur correspondante aux différentes mesures capturées. Le dernier vecteur, qui constitue la dernière mesure, correspond au vecteur avec la couleur la plus sombre et la plus courte longueur. Ceci implique une faible intensité du vecteur de force d'interférence.

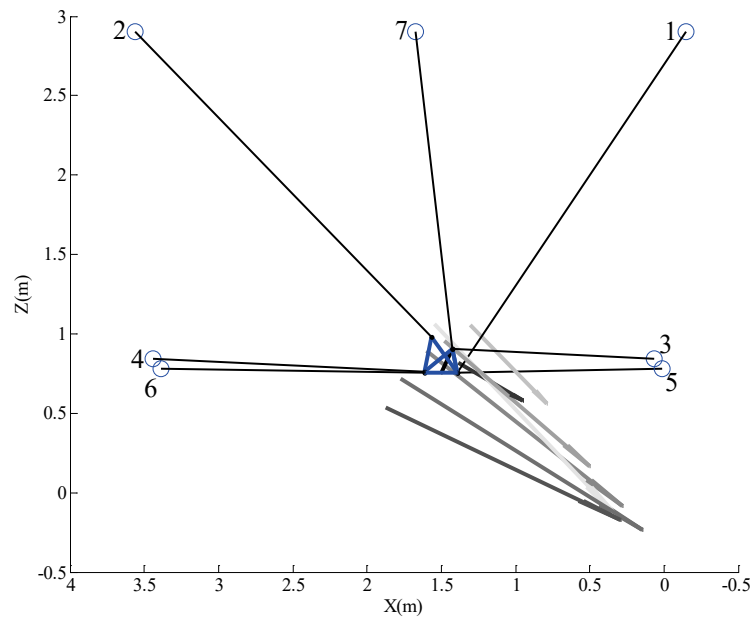


(a) Forces agissant sur la plateforme mobile pour toute la durée de l'expérience

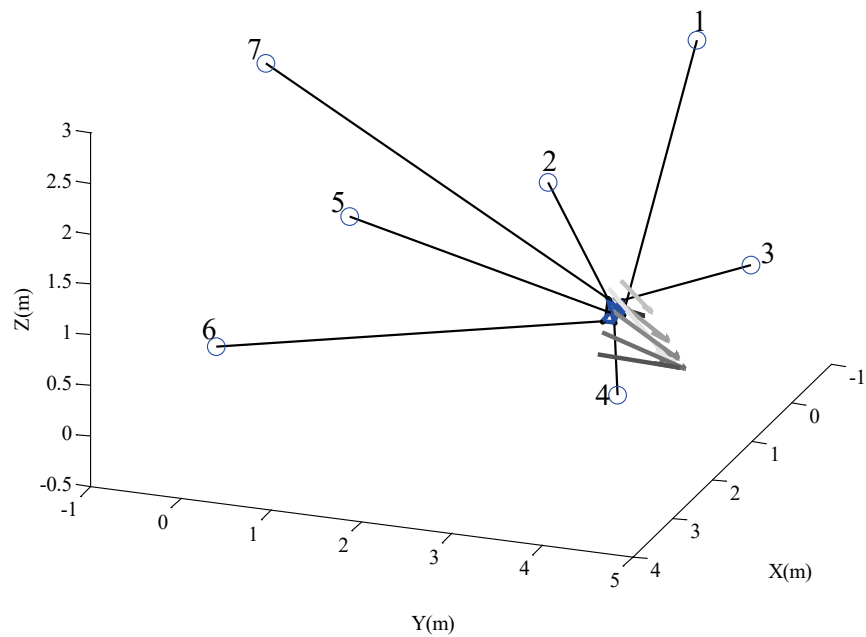


(b) Forces agissant sur la plateforme mobile durant une période de temps

Figure 4-19 : Forces appliquées sur le mécanisme pendant la deuxième expérimentation



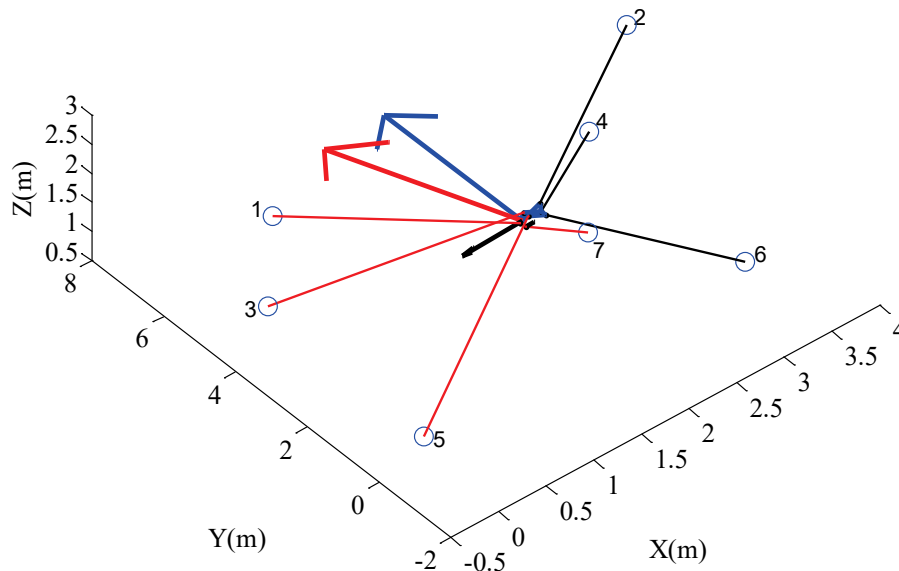
(a) Vue de face du MPEC avec une représentation des vecteurs forces interférences



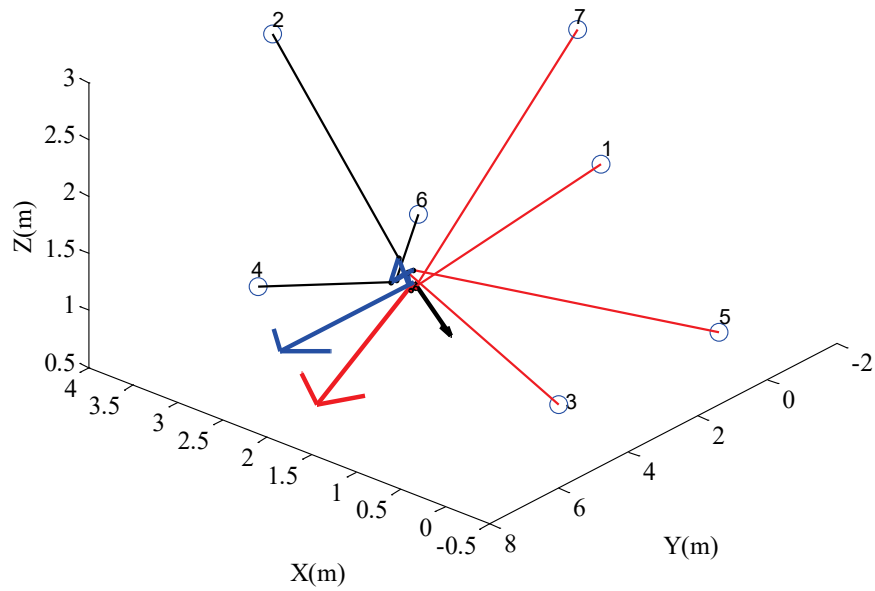
(b) Vue de côté du MPEC avec une représentation des vecteurs forces interférences

Figure 4-20 : Représentation de la force d'interférence pour la deuxième expérience

Le résultat de la dernière expérience est présenté à la figure 4-21. Les deux images dans cette dernière sont identiques, mais avec une vue différente. La position du MPEC est de 2,22 m en x , 3,22 m en y et 1,033 m en z et la distance entre les paires de câbles (1,3) et (5,7) sont respectivement de 5,9 cm et de 6,1 cm. Dans ce cas, les paramètres de la fonction logistique sont respectivement de 5,7 cm, 6,2 cm et 2 N pour la distance minimale, maximale et la force maximale. Les câbles en interférence sont représentés en couleur rouge et le vecteur de couleur noire correspond à la force d'interférence générée par l'algorithme. Comme on peut le constater, le vecteur de force d'interférence est orienté dans la bonne direction et admet un déplacement sur le plan de l'interférence pour éviter le croisement des câbles. La figure 4-22 (a) montre les trois forces appliquées et la figure 4-22 (b) comprend un élargissement de cette dernière.

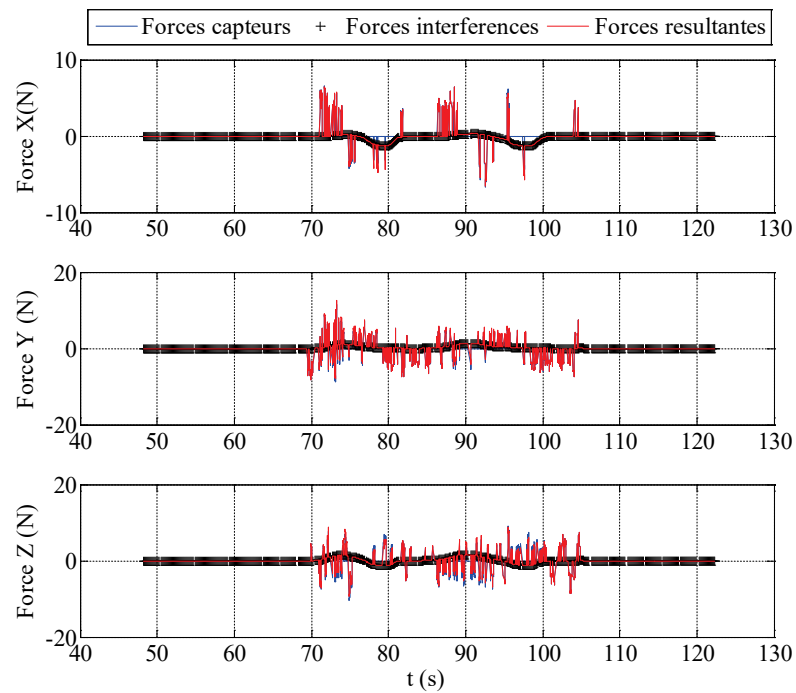


(a) Image instantanée du mécanisme à $t = 95.35$ s avec vue de dessus

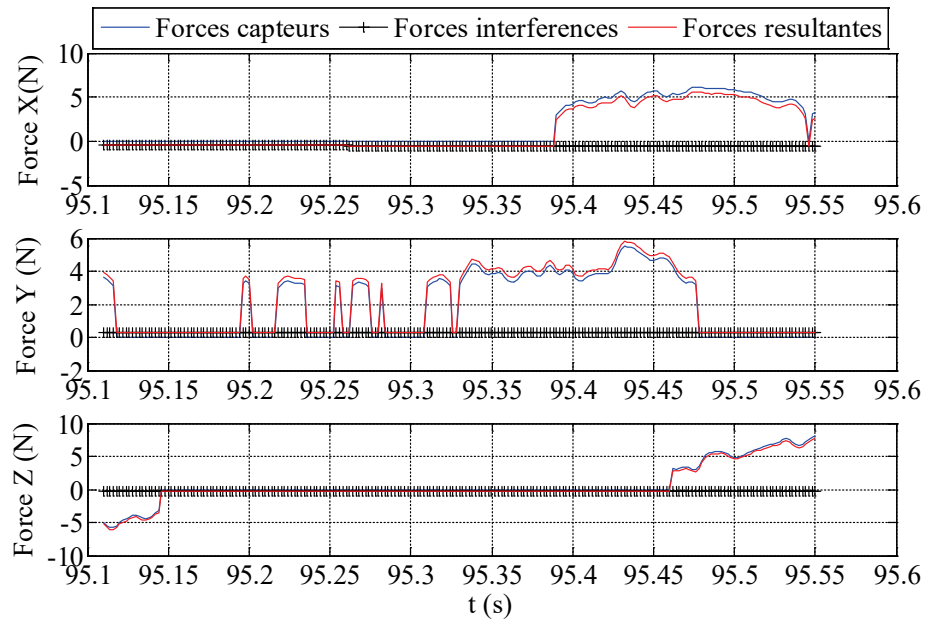


(b) Image instantanée du mécanisme à $t = 95.35$ s avec vue de côté

Figure 4-21 : Illustration de la troisième expérience avec deux interférences



(a) Forces agissant sur la plateforme mobile pour toute la durée de l'expérience



(c) Forces agissant sur la plateforme mobile durant une période de temps

Figure 4-22 : Forces appliquées au MPEC lors de la troisième expérience

La stratégie de commande proposée permet de gérer l'interférence entre les câbles pendant l'interaction physique afin de continuer la tâche à la limite de la géométrie et de la cinématique. Cependant, le croisement peut se produire dans le cas où l'opérateur applique une force importante par rapport à la force d'interférence. Dans cette situation, la résultante des forces sera presque égale à la force appliquée (capteur), puisque la force d'interférence est fixe et prédéfinie au préalable. La solution serait de limiter la force appliquée afin d'éviter l'écart entre les deux forces. Toutefois, cette solution peut limiter le mécanisme dans la tâche de coopération avec l'opérateur selon l'activité industrielle comme le déplacement d'une pièce lourde.

4.5 Discussion et conclusion

Ce chapitre propose une stratégie de commande interactive permettant de gérer les interférences lorsque le croisement et le relâchement entre deux câbles sont évités pendant l'interaction physique entre l'humain et le mécanisme. La commande, basée sur un modèle en admittance, calcule une force d'interférence virtuelle afin de permettre uniquement des déplacements sur le plan interférentiel sans le traverser. Cette force est définie à partir d'un gradient qui permet de déterminer la direction de la force et d'une fonction logistique qui constitue son amplitude. Par ce fait, la tâche est exécutée jusqu'aux limites des possibilités géométriques et cinématiques du mécanisme. Par ailleurs, deux approches de calcul de la direction de la force sont proposées dans ce chapitre, à savoir le calcul du gradient en translation et le calcul du gradient en translation et en rotation. La stratégie de commande a été mise en œuvre et validée à travers des simulations et des expérimentations. Ces dernières se sont déroulées sur le mécanisme parallèle entraîné par sept câbles situé au laboratoire de robotique de l'Université Laval.

Les simulations ont permis de valider la méthode utilisant le calcul de gradient en translation et en rotation. Néanmoins, des expérimentations incluant les rotations n'ont pas pu être réalisées suite à des contraintes matérielles. Pendant les simulations, une limitation du mouvement de rotation a été imposée afin d'éviter les collisions entre les câbles et la plateforme mobile. Cette limitation fixée à $\pm 90^\circ$ est un seuil qui a été sélectionné à partir d'observations du mécanisme réel. Cependant, ce seuil n'est pas optimal et ne convient pas

à tous les cas puisque dans certaines configurations, les câbles pourraient entrer en collision avec l'effecteur avant de l'atteindre. De même, dans d'autres configurations, la rotation autour d'un axe pourrait dépasser ce seuil sans provoquer de collisions.

La deuxième méthode basée sur le calcul du gradient en translation uniquement a été validée à travers des expériences sur le mécanisme parallèle entraîné par sept câbles. D'ailleurs, deux extensions vidéo sont proposées avec ces résultats dans lesquelles les deux dernières expérimentations sont illustrées. Le gradient est calculé et la force d'interférence générée lorsque la distance entre les câbles n'est pas respectée. Parfois, le gradient pourrait indiquer une direction où l'effecteur se dirige vers une des limitations de l'espace de travail. En effet, généralement les déplacements de la plateforme mobile sont limités à la structure du MPEC et au maximum permis de distorsion de l'axe des câbles sortant des enrouleurs. Plus les câbles sont déviés de leur axe plus les frottements sont importants. Ainsi, le calcul du gradient ne prend pas en considération cette limitation de l'espace de travail et pourrait diriger l'effecteur selon l'un des axes x , y ou z , vers ce mur virtuel (limitation de l'espace de travail). Dans cette situation, l'effecteur reste bloqué sur cet axe, mais continue à avoir de petits déplacements sur les autres axes. Après un court instant, ces petits déplacements vont permettre de rediriger vers une autre direction puisque le vecteur gradient est calculé en dérivant par rapport à la position \mathbf{p} . Cependant, ces situations ont été observées lorsque le MPEC se déplace sans coopération. En effet, lors de l'interaction physique l'opérateur détermine la position et la vitesse suivie par le MPEC et en principe, cette limitation de l'espace de travail est prise en considération pendant les déplacements.

La méthode pourrait admettre la collision entre deux câbles en interférence sans provoquer de croisement ni de relâchement de l'un des câbles. Cette situation n'a malheureusement pas été validée puisqu'une distance minimale a été imposée tout au long des expériences afin de prendre en compte l'imprécision dans le calcul de distance entre les câbles.

Dans une cellule hybride, les qualités humaines avec celle du mécanisme sont réunies dans un même espace de travail. Toutefois, l'opérateur devrait choisir d'une manière automatique entre les modes d'interaction. Le chapitre suivant présente un algorithme permettant la sélection entre ces deux modes d'interaction utilisant un vêtement intelligent.

CHAPITRE 5

SÉLECTION ENTRE LE MODE DE PARTAGE DES ACTIVITÉS ET D'INTERACTION PHYSIQUE BASÉ SUR UNE SEMELLE INSTRUMENTÉE

Les généralités présentées au chapitre 1 ont introduit les différents types d'interaction entre l'humain et le manipulateur existant en industrie. Dans ce projet de recherche, deux modes d'interaction sont étudiés, à savoir, le partage des activités et l'interaction physique. Le premier mode a été discuté au deuxième chapitre et le deuxième mode au quatrième chapitre. Toutefois, il est primordial d'utiliser les deux types d'interaction dans un même espace de travail afin d'optimiser un système interactif complet. Dans ce chapitre, un algorithme basé sur une identification de gestes est proposé. Il permet de sélectionner entre ces deux modes, en analysant des données de capteurs récupérées à travers une semelle instrumentée. Les mesures sont identifiées à l'aide d'un modèle d'identification des gestes du pied. L'algorithme est validé à travers des expérimentations sur le MPEC à sept câbles introduit au chapitre 3.

5.1 Introduction

Afin de répondre aux nouveaux besoins industriels, une des solutions pour améliorer l'intuitivité et la flexibilité est de travailler en coopération avec des manipulateurs afin de réunir les qualités humaines avec celles du mécanisme dans un même espace de travail. Par exemple, le manipulateur pourrait participer à des tâches répétitives avec l'opérateur comme pour l'assemblage, ou bien il pourrait être utilisé pour soulever et déplacer des charges lourdes. Dans ces exemples, les modes d'interaction abordés sont respectivement le partage des tâches d'activités et l'interaction physique. Cependant, afin d'optimiser un tel système, l'opérateur devrait changer d'une manière automatique, simple et rapide entre ces deux modes sans retarder ou arrêter le procédé.

Généralement, deux solutions peuvent être considérées, soit utiliser les capteurs intrinsèques et extrinsèques disposés sur le manipulateur comme des capteurs de forces et de couples [118], soit des instruments qui ne sont pas en contact direct avec le manipulateur comme le capteur caméra [119] où la détection de gestes précis permettent d'activer un mode. Les paragraphes suivants proposent une revue de la littérature sur les deux solutions. À partir de cette revue, un algorithme est proposé où ce dernier permet de sélectionner un mode d'interaction. La dernière section de ce chapitre aborde des résultats expérimentaux sur le mécanisme parallèle entraînés par sept câbles.

5.1.1 Distinction de mode en considérant des capteurs intrinsèques et extrinsèques

Dans la littérature de l'interaction physique, la détection du taux de variation des signaux des capteurs est considérée pour l'activation de mode. Toutefois, dans ce cas il est primordial d'identifier le point de contact entre l'humain et le manipulateur afin de distinguer entre une collision ou un contact intentionnel [120, 121]. Un algorithme de détection de collision qui permet la distinction entre un contact prévu et imprévu (collision) est présenté dans [122]. Le taux de variation du couple est utilisé pour différencier entre un impact et un contact intentionnel. Ce dernier est distingué si la variation du couple augmente de manière lente et graduelle, par rapport à une collision où des impulsions sont détectées dans la variation. Toutefois, la lecture de la variation du couple pourrait être difficile à définir dans le cas où un contact intentionnel et une collision se produisent au même moment. Dans [123], le contact intentionnel est détecté uniquement sur l'effecteur du manipulateur. Tout autre contact avec une partie du manipulateur est considéré comme une collision. En effet, la lecture de variation du couple se fait à deux endroits différents, à savoir, sur l'effecteur et sur le reste des membres du manipulateur. Dans ce dernier, la collision est détectée selon un index prédéfini et appliqué à la variation du couple.

Un autre exemple présenté dans [65], où uniquement les signaux de courant des moteurs sont utilisés sans ajouter de capteur aux articulations du manipulateur. Deux filtres sont appliqués sur les mesures afin de distinguer entre une collision et un contact intentionnel. Un filtre passe-haut est appliqué pour les contacts imprévus et un filtre passe-bas pour les

contacts prévus, par la suite deux règles sont définies afin de distinguer entre les deux contacts. Cette approche permet de résoudre le cas où les deux contacts sont détectés au même moment. Cependant, le contact doit être de manière contrôlée et régulée sans gestes brusques afin de détecter l'intention d'interaction physique. En effet, un geste brusque pourrait se traduire par une impulsion dans le signal du courant, par ce fait, il pourrait être interprété comme une collision à travers le filtre passe-haut. Golz et al. [124] proposent une méthode basée sur des SVM pour distinguer entre une collision et une interaction à partir d'apprentissage sur le signal du couple. Cependant, cette classification est établie selon des profils de collisions spécifiques.

Bien que ces solutions proposent des résultats concluants, ceux-ci requièrent généralement un entraînement ou une formation de l'opérateur pour lui permettre d'apprendre le geste tel que défini, comme le former à avoir un geste contrôlé sans mouvement brusque. D'autres solutions qui considèrent l'utilisation d'instruments sont discutées à la section suivante.

5.1.2 Distinction de mode en utilisant un instrument externe

L'intention humaine peut aussi être détectée à l'aide d'un dispositif de surveillance vidéo comme les caméras. Par exemple, les gestes pour l'assemblage collaboratif ont été étudiés et identifiés dans [125]. Le bras de l'opérateur est détecté à l'aide d'une caméra et interprété par le manipulateur, afin que ce dernier suive des instructions. De Luca et al. [126]

proposent un changement de mode à travers une détection d'agitation de la main à l'aide du Kinect. De plus, des commandes vocales ou une combinaison des deux sont également proposées. Dans [127], une approche basée aussi sur le Kinect et une caméra installée sur l'effecteur du robot permet une reconnaissance des intentions et une collaboration avec le robot. On retrouve dans la littérature beaucoup de méthodes utilisant la caméra pour la reconnaissance des gestes [128-130].

Évidemment, ces approches fournissent des résultats concluants. Cependant, l'utilisation d'une caméra pour la détection de gestes dans le secteur industriel pourrait présenter certains inconvénients [131]. En effet, les conditions d'éclairage et les réflexions lumineuses sur des pièces métalliques ou en verre (installées sur une porte de voiture par exemple) peuvent affecter la qualité des images et donc de la reconnaissance. En outre, une fausse détection due à des pièces en mouvement ou une intrusion dans le champ de vision pourrait aussi causer des problèmes de détection. Une autre technologie utilisée pour la reconnaissance des intentions humaines est la commande vocale [132, 133]. Toutefois, ce type de technologie nécessite un environnement silencieux pour avoir de bonnes performances, sinon, la reconnaissance vocale est compromise et l'ordre des séquences pourrait être mal compris.

De nombreuses approches basées sur des accéléromètres ou des centrales inertielles (IMU pour *Inertial Measurement Unit*) à neuf degrés de liberté permettent la reconnaissance des gestes d'un membre du corps de l'utilisateur. Les IMU contiennent un accéléromètre, un

magnétomètre et un gyroscope à trois degrés de liberté pour chaque module. Par exemple, les auteurs dans [134] proposent une approche de détection et de suivi de personne à base d'un télémètre laser et de capteurs portables IMU. Le télémètre laser permet le suivi des jambes de la personne et les capteurs IMU montés sur le bassin permettent la capture du mouvement et de l'orientation au cours de la marche.

On retrouve les travaux de Liu et al. [135] qui présentent un algorithme de reconnaissance de gestes personnalisé à base de la DTW (pour *Dynamic time warping*) et d'un accéléromètre à trois axes. Cet algorithme nommé *uWave*, nécessite un échantillon d'apprentissage unique pour chaque modèle de gestes et permet aux utilisateurs d'employer des gestes personnalisés et des manipulations physiques. D'après les résultats annoncés, *uWave* atteint les 98,6% en taux de classification. Cependant, la base d'apprentissage est conçue sur les gestes personnalisés d'une personne. Par ce fait, les performances de l'algorithme sont limitées à cette personne et pourraient être réduites dans le cas de plusieurs utilisateurs [136]. Une autre méthode basée sur l'algorithme DTW proposée dans [137] permet d'obtenir de bonnes performances dans le cas de plusieurs utilisateurs. En effet, dans cette approche un dictionnaire de gestes où les mouvements sont classés, a été ajouté dans l'étape de prétraitement. Dans le domaine de la santé, des accéléromètres sont aussi utilisés pour évaluer le risque de chutes chez les personnes âgées [138, 139]. Ce système permet d'évaluer le risque d'une chute ou même une chute.

Divers instruments à base d'accéléromètres sont utilisés pour l'identification de gestes comme des gants [140], des manettes [141], des boîtiers de capteurs attachés au bras et en haut du corps [142] ou une montre intelligente [143]. Cependant, peu d'attention a été portée pour des instruments placés au niveau du pied. En industrie, l'utilisation des mains peut être problématique pour changer de mode d'interaction puisque l'opérateur pourrait accomplir sa tâche de manutention au même moment. En outre, le pied constitue un endroit sensible aux vibrations pour alerter par exemple l'utilisateur en cas de danger [144]. Un exemple d'application est proposé dans [145, 146] où des messages sont transmis à l'utilisateur avec des vibrations à travers les pieds. Ben Brahem et al. [147] présentent un suivi de l'utilisateur dans un environnement réel et une cartographie des gestes dans un environnement virtuel. L'instrument utilisé est un accéléromètre à trois degrés de liberté attaché au niveau du pied. Un autre système proposé dans [148, 149] permet de prévenir les chutes accidentelles liées aux conditions physiques utilisant une semelle instrumentée. À la connaissance de l'auteur, ce genre de système basé sur une semelle instrumentée et appliquée dans un milieu industriel n'a jamais été utilisé dans le cadre d'interaction humain manipulateur. La section suivante propose cette approche pour la sélection du mode d'interaction.

5.2 Approche proposée pour la sélection de mode

Pendant l'interaction avec le manipulateur, l'opérateur devrait pouvoir changer de mode de manière intuitive, rapide et avoir les mains libres pour manipuler des objets. L'une

des solutions consiste à utiliser le pied comme une commande qui permet de sélectionner un des deux modes. Le dispositif proposé est une semelle instrumentée contenant un ensemble de capteurs pour analyser les mouvements. Cet instrument développé par l'équipe de recherche de l'UQAC au laboratoire LAR.i [150, 151] est utilisé dans de nombreuses applications. Dans notre cas, l'outil de mesure désigné est inspiré des systèmes réalisés précédemment.

5.2.1 Instrument proposé pour le changement de mode

La semelle utilisée, illustrée à la figure 5-1, contient un accéléromètre à trois dimensions pour détecter les gestes ainsi que des capteurs de forces résistifs (FSR pour *Force Sensitive Resistor*) placés sur la semelle à des positions bien précises. La valeur de sortie de ces capteurs varie proportionnellement à la pression appliquée. Deux capteurs à l'avant de la semelle, à savoir, un à droite et un à gauche. L'autre capteur est positionné à l'arrière centré au niveau du talon. Ces capteurs sont placés sur la partie supérieure de la semelle qui est en contact avec le pied. En ce qui concerne la partie inférieure, elle est en contact avec la chaussure et permet de couvrir les capteurs de la partie supérieure.

La figure 5-2 présente le schéma ainsi que les composants électroniques de la semelle. Un régulateur de tension est ajouté afin de fournir une tension de 3.3V dédiée à l'accéléromètre.

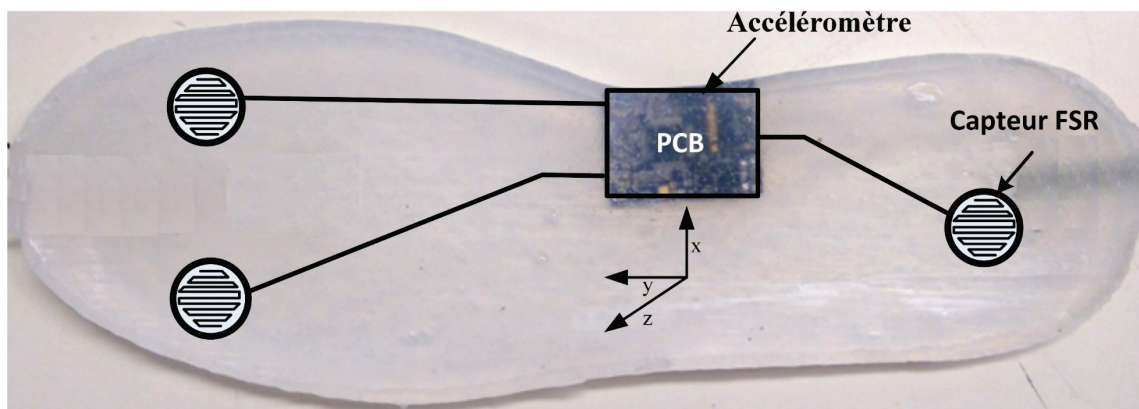


Figure 5-1 : Prototypé de la semelle instrumentée pour le pied droit

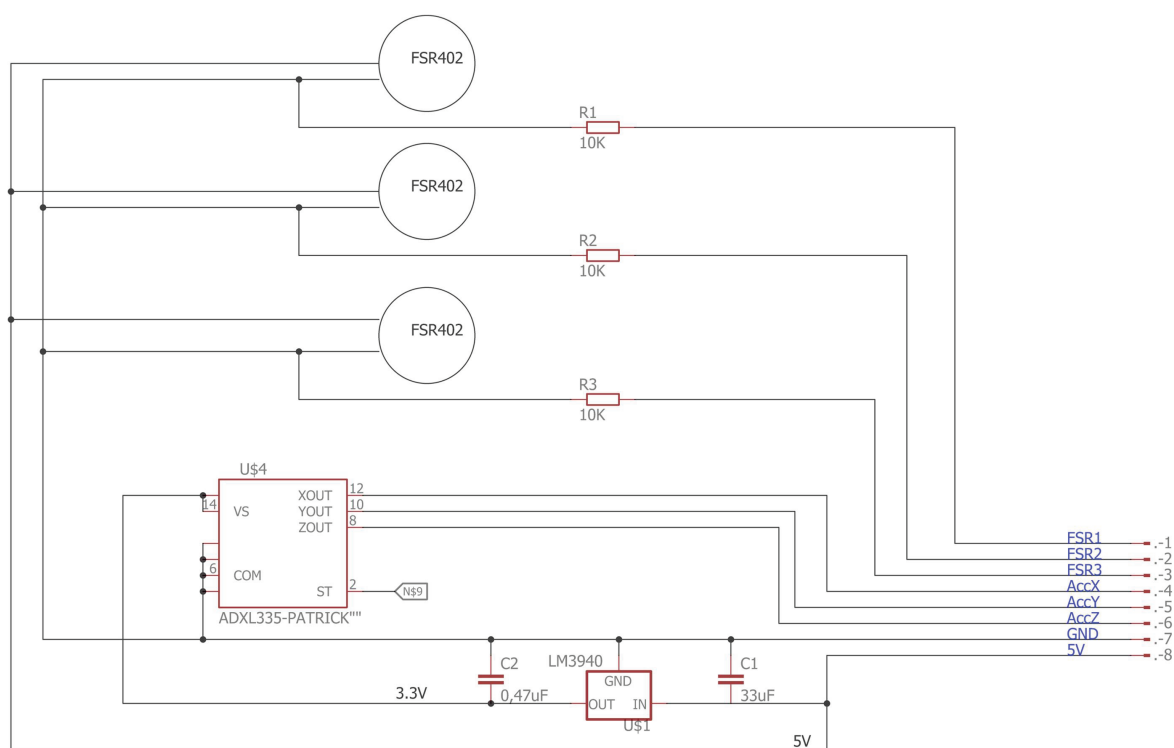


Figure 5-2 : Schéma électrique et représentation des composants

Après la réalisation de la semelle, il est primordial de définir un geste facile, non récurrent et intuitif pour basculer entre deux modes d'interaction. Cependant, le choix de ce geste ne devrait pas correspondre à des mouvements communs comme pivoter ou marcher afin d'éviter les fausses détections. En effet, l'algorithme est exécuté en temps réel et évalue les données reçues à chaque itération. Une classification du geste ainsi que le modèle retenu pour le reconnaître sont définis dans la section suivante. Il est à noter que ces travaux ont débutés conjointement avec un autre étudiant [152] qui a défini le geste à suivre.

5.2.2 Classification du geste

Une classification du geste permet de définir l'ensemble du mouvement afin de le différencier clairement par rapport aux autres. Le geste étudié pour la sélection du mode d'interaction peut être représenté visuellement par celui utilisé lors de l'écrasement d'une cigarette au sol avec le pied. Il est composé tout d'abord d'un basculement vers l'avant du pied où le talon n'est plus en contact avec le sol. Ensuite, des mouvements de rotation sont effectués selon l'axe vertical, et enfin le talon du pied est à nouveau posé au sol. La figure 5-3 illustre le geste à suivre laquelle a été inspiré de l'image présentée dans [152]. Les trois points bleus représentés sur la plante du pied simulent les trois capteurs FSR disposés sur la semelle. En effet, lorsque le pied est au sol les capteurs sont sous pressions, par ce fait, des mesures sont enregistrées et les trois capteurs sont activés. Dès que le talon du pied est soulevé, le FSR situé à cet endroit n'est plus actif. Toutefois, les deux autres FSR doivent

être actifs pendant la réalisation du mouvement de rotation selon l'axe vertical. Le geste choisi est non récurrent, facile, intuitif et connu de tout le monde.

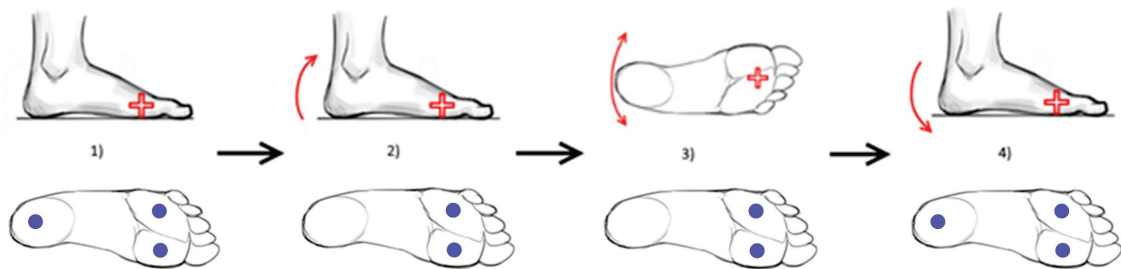


Figure 5-3 : Geste pour le changement de mode utilisant la semelle instrumentée [152]

En effet, son apprentissage peut se réaliser facilement chez toutes les personnes sans nécessairement poursuivre une formation particulière au préalable. En outre, l'effort fourni pour effectuer le geste est minime et l'utilisateur conserve le pied au sol. Par ce fait, il est exécuté sans que la personne perde son équilibre ou sa stabilité. Par ailleurs, les chances d'associer ce geste à un autre est peu probable puisqu'il est unique et différent de ceux habituels comme pivoter ou se baisser pour récupérer un objet. Par conséquent, ce geste semble être adapté pour le changement de mode d'interaction en milieu industriel.

5.2.3 Modèle d'identification du geste

Après la définition du geste, les données du capteur d'accéléromètre sont analysées afin d'identifier un modèle. Ce dernier permet de caractériser à partir d'une équation le

comportement de l'accéléromètre. Plusieurs méthodes peuvent être appliquées, on note principalement des approches standards comme la modélisation [153], les métamodèles et les approximations [154, 155]. Dans ce dernier, on retrouve l'interpolation polynomiale qui est appliquée dans de nombreux domaines pour estimer les caractéristiques dynamiques des systèmes [156]. Dans notre cas, l'utilisation d'un polynôme pourrait être une solution pour caractériser l'accéléromètre situé dans la semelle. Les étapes conduisant au choix du polynôme d'interpolation sont décrites dans les paragraphes suivants.

La première étape consiste à récupérer les signaux de l'accéléromètre pour les analyser. La semelle est installée dans la chaussure droite, ensuite le geste de changement de mode est exécuté, à savoir le basculement du pied vers l'avant et les mouvements de rotation selon l'axe de z (axe vertical). La figure 5-4 présente les signaux lors des rotations. Afin de faciliter l'interpolation et la détermination des coefficients du polynôme (utilisation d'un polynôme au lieu de trois), la norme de l'accéléromètre est calculée et utilisée pour l'analyse. La figure 5-5 illustre la norme des signaux présentés à la figure 5-4.

Après avoir récupéré les signaux et calculé la norme de l'accéléromètre, la seconde étape consiste à déterminer l'équation qui permettra de caractériser le signal de la norme. Cette dernière peut être décomposée en une simple fonction de sinus et cosinus selon la série de Fourier. En outre, le signal contenant la rotation est supposé être périodique par rapport à la longueur totale du signal. En effet, les mouvements de rotation sont répétés par la même personne de la même manière et donc à la même fréquence.

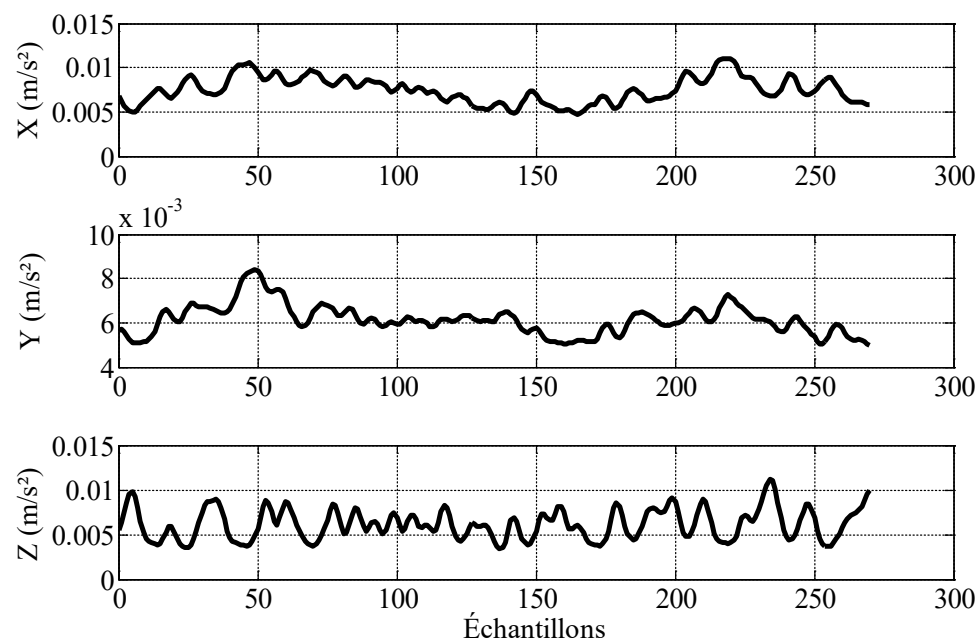


Figure 5-4 : Signaux de l'accéléromètre à trois degrés de liberté

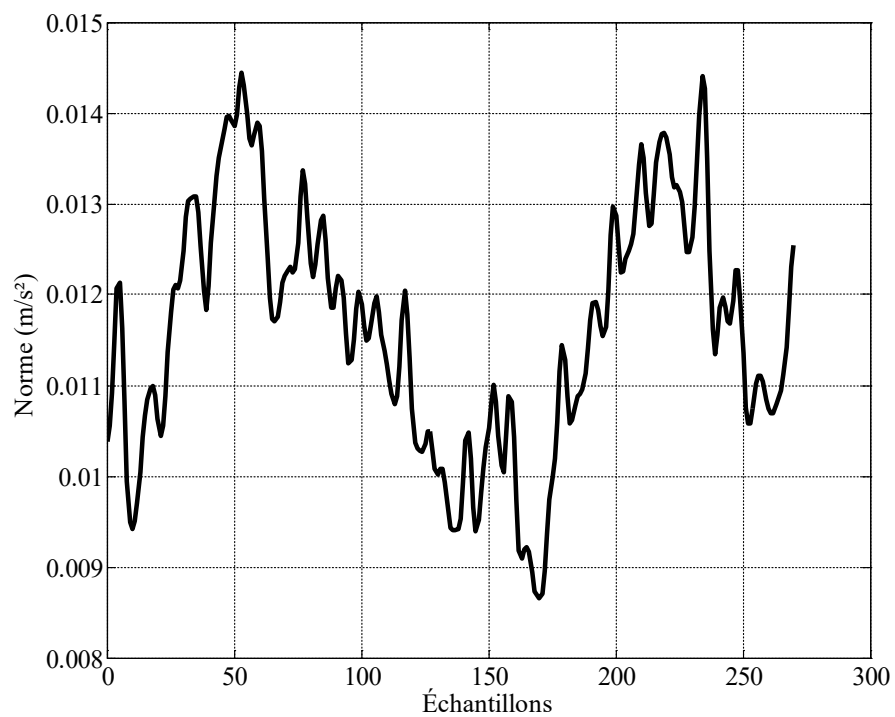


Figure 5-5 : Norme de l'accéléromètre pendant le geste de rotation

Dans notre méthode, uniquement le nombre de répétitions (de rotation) peut être changé selon la définition établie. Par conséquent, une approximation utilisant un polynôme de série de Fourier [157, 158], qui est basée sur le polynôme d'interpolation trigonométrique [159], semble être une solution adaptée par rapport aux caractéristiques du signal. Le polynôme est défini comme suit :

$$P(x) = a_0 + \sum_{k=1}^k a_k \cos(kwx) + \sum_{k=1}^k b_k \sin(kwx). \quad (5-1)$$

Dans cette expression, w est la fréquence fondamentale de la série et a_0 , a_k et b_k sont les coefficients d'ajustement du polynôme avec k qui est le nombre de coefficients. Cette fonction non linéaire pourrait être résolue en utilisant une simple méthode d'estimation des coefficients à partir d'observations. Les moindres carrés non linéaires sont considérés où y_i représente les observations (mesures). La fonction est définie comme suit :

$$y_i = a_0 + \sum_{k=1}^k a_k \cos(kwx_i) + \sum_{k=1}^k b_k \sin(kwx_i). \quad (5-2)$$

Pour trouver les paramètres qui ajustent au mieux les données, la somme des écarts aux carrés entre les valeurs observées et la fonction doit être minimale. Si ε_i représente cet écart alors :

$$\varepsilon_i = y_i - \left(a_0 + \sum_{k=1}^k a_k \cos(kwx_i) + \sum_{k=1}^k b_k \sin(kwx_i) \right), \quad (5-3)$$

On pose $\mu_i = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2$, avec n qui est le nombre des observations. La valeur de la fréquence w est constante puisque le signal est périodique. Elle est estimée à partir de la norme de l'accéléromètre présenté à la figure 5-5. Dans ce cas, la matrice jacobienne est définie comme suit :

$$H = \frac{\partial \mu}{\partial \mathbf{v}}, \quad (5-4)$$

avec :

$$\mathbf{H}_{n \times m} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mu_1}{\partial a_0} & \frac{\partial \mu_1}{\partial a_1} & \frac{\partial \mu_1}{\partial b_1} & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{\partial \mu_1}{\partial b_k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial \mu_n}{\partial a_0} & \frac{\partial \mu_n}{\partial a_1} & \frac{\partial \mu_n}{\partial b_1} & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{\partial \mu_n}{\partial b_k} \end{pmatrix},$$

et :

$$\mathbf{v} = (a_0, a_1, b_1, \dots, a_k, b_k).$$

Il est à noter que la matrice \mathbf{H} est différente de la matrice jacobienne du MPEC, mais représente plutôt la matrice du problème. \mathbf{v} représente les paramètres du polynôme qui le caractérise. Puisque le polynôme contient k coefficients de a et de b , ainsi que a_0 , par ce fait $m = (k \times 2) + 1$. Ce modèle d'identification permet d'identifier les mouvements de rotation du pied effectué par l'opérateur. Il est utilisé dans un algorithme exécuté en temps réel et qui permet d'analyser les données des capteurs.

5.2.4 Algorithme de sélection de mode

La première étape de l'algorithme illustré à la figure 5-6 consiste à récupérer les mesures des capteurs situés dans la semelle, à savoir les trois capteurs FSR et les trois composantes de l'accéléromètre. Ces données sont filtrées en utilisant un filtre de moyenne glissante afin de supprimer des fluctuations temporaires et aussi d'atténuer les pics transitoires dans les signaux. En outre, un autre filtre passe-bande est appliqué aux trois composantes de l'accéléromètre pour réduire les fréquences associées aux bruits.

Puisque le flux de données est continu dans le temps, l'analyse des signaux est effectuée par des ensembles de points pendant toute la durée de la réception des données. En effet, une fenêtre contenant un nombre déterminé de mesures est appliquée pour examiner une portion du signal. Une fois que l'analyse de cette portion est finalisée, la fenêtre se déplace pour examiner un autre ensemble de données. La longueur de cette fenêtre mobile

devrait avoir le même nombre de points que le modèle d'identification et la même longueur que les mouvements de rotation.

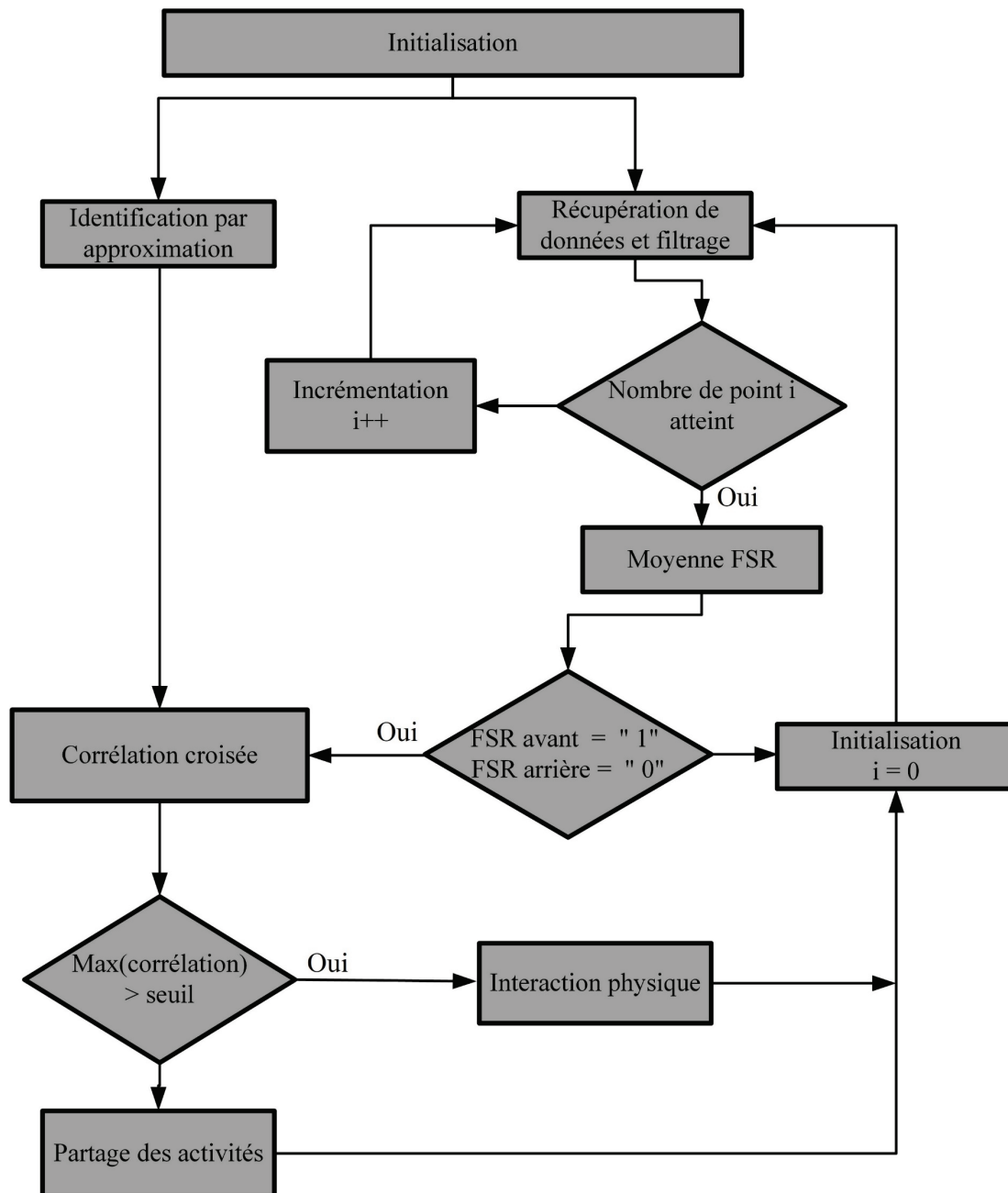


Figure 5-6 : Algorithme temps réel pour sélectionner le mode d'interaction

En effet, une correspondance est appliquée entre les mesures analysées et l'approximation afin d'identifier les mouvements de rotation. La sélection de mode est déterminée selon deux conditions : la première confirme si le basculement vers l'avant du pied est effectué. Cette information est analysée en utilisant les FSR de la semelle, où une pression est appliquée sur les deux capteurs en avant. Puisque le talon n'est pas en contact avec le sol, le capteur situé à l'arrière ne devrait pas être sous pression. Ainsi, la première condition est validée si les deux capteurs FSR avants sont activés et celui de derrière est désactivé. Suite à la validation de la première condition, la deuxième consiste à évaluer le signal de l'accéléromètre afin de détecter les mouvements de rotation. L'évaluation est pratiquée en utilisant une corrélation croisée entre les deux signaux, à savoir le modèle d'identification et la norme de l'accéléromètre. Cette dernière est calculée à partir d'un intervalle de données incluant un ensemble de points de dimension égale. Si une similarité est détectée, la valeur maximum du résultat devrait être supérieure au seuil prédéfini, dans ce cas, le mode sélectionné est celui de l'interaction physique. Par ailleurs, le seuil est établi en pratiquant des expérimentations et en analysant les données pour la conception du modèle d'identification. La section suivante présente les résultats obtenus lors des expérimentations sur le MPEC à sept câbles.

5.3 Expérimentations de l'algorithme sur le mécanisme

L'algorithme présenté précédemment (figure 5-6) est mis en œuvre dans Matlab-Simulink et compilé avec RT-LAB. Des expérimentations ont été réalisées sur le mécanisme

parallèle entraîné par sept câbles introduit dans le chapitre 3 et illustré à la figure 4-4. Les mesures des capteurs situés dans la semelle sont récupérées à partir d'entrées analogiques d'une interface d'acquisition connectée à l'unité de calcul. Cette dernière permet d'exécuter les différents algorithmes et de traiter les informations des capteurs. Ensuite, ces informations sont transmises à l'interface opérateur (ordinateur) pour un affichage ou pour l'activation d'une commande ou d'un programme. La figure 5-7 illustre les connections entre la semelle et les différentes unités de commande et de calcul ainsi que de puissance.

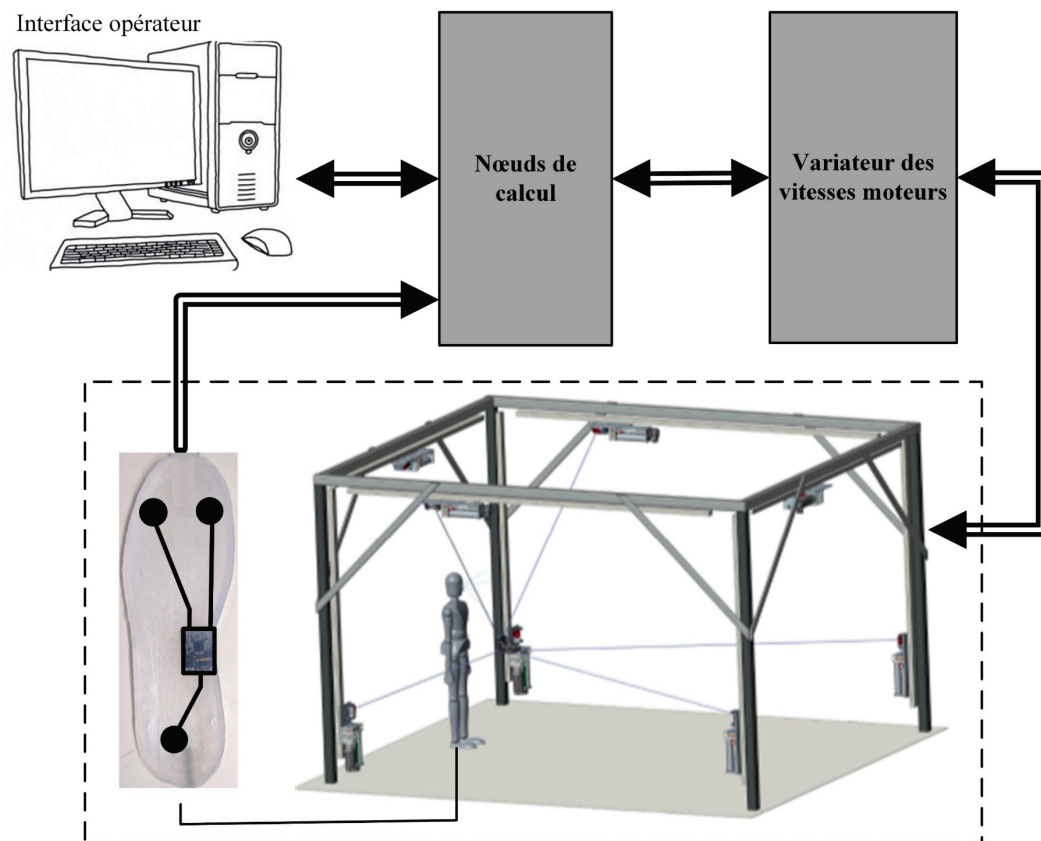


Figure 5-7 : Montage expérimental pour valider l'algorithme de sélection de mode

Il est à noter que la fréquence de fonctionnement (période d'échantillonnage) est de 500 Hz, en d'autres termes, les mesures des capteurs accéléromètre et FSR sont récupérées à chaque 2 ms. Les sections suivantes présentent en premier lieu le modèle retenu, et en second lieu les résultats des expérimentations.

5.3.1 Détermination du modèle d'identification et des seuils de validation

L'auteur, qui agit à titre d'évaluateur de sa technologie, place la semelle dans la chaussure du pied droit et sélectionne le nombre de rotations pour effectuer le geste du pied retenu, qui est représenté visuellement par un mouvement d'écrasement d'une cigarette. Comme présenté précédemment à la section 5.2.2, le geste comprend un basculement vers l'avant du pied où le talon n'est plus en contact avec le sol et des mouvements de rotation. Dans notre cas, ces derniers sont composés d'un premier mouvement vers la gauche, ensuite retour vers la droite et un dernier vers la gauche. La norme de l'accéléromètre des mouvements de rotation est illustrée à la figure 5-5.

Afin d'établir les paramètres du polynôme d'interpolation, incluant le nombre de coefficients k , plusieurs degrés de polynôme sont testés. La procédure se déroule comme suit : les données sont récupérées à partir de la semelle où le geste d'écrasement de cigarette est pratiqué. Ces mesures correspondent aux données d'observations qui permettront de déterminer le nombre de coefficient et de les estimer à l'aide de la méthode des moindres carrés non-linéaires. Ensuite, plusieurs nombres de coefficients sont testés et comparés en

calculant l'erreur quadratique moyenne (RMSE pour *Root-Mean-Square Error*). Le tableau 5-1 présente quelques résultats retenus lors des tests et la figure 5-8 une comparaison entre le nombre de coefficients du polynôme. On constate que le nombre de coefficients est proportionnel à l'erreur RMSE.

Tableau 5-1 : Comparaison entre les nombres de coefficients

$k =$	2	5	8	9	10
RMSE	0.0007	0.00058	0.00052	0.00048	0.00047

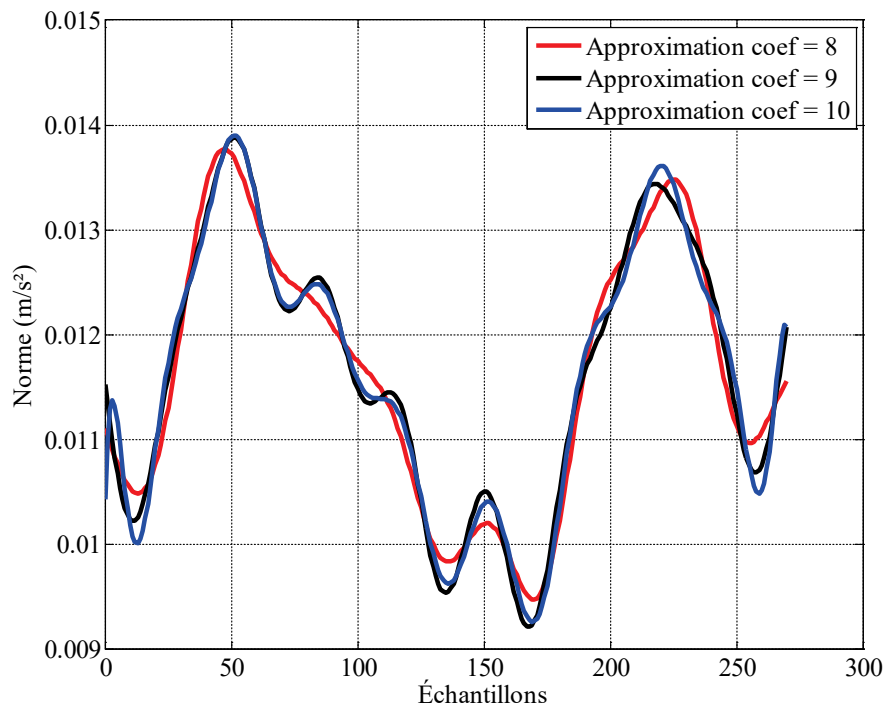


Figure 5-8 : Comparaison des courbes d'approximation

Plus le nombre des coefficients augmente plus l'erreur RMSE diminue. Par ailleurs, on constate aussi qu'après le nombre de huit coefficients les variations de RMSE sont minimales. Par exemple, entre neuf et dix coefficients l'erreur quadratique varie de 0.00001. L'algorithme de sélection de mode a été testé avec les trois nombres de coefficients, à savoir, huit, neuf et dix, toutefois, uniquement les résultats avec neuf coefficients sont présentés dans cette section. En remplaçant k par 9 et m par 19, la matrice \mathbf{H} est définie comme suit :

$$\mathbf{H}_{n \times 19} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mu_1}{\partial a_0} & \frac{\partial \mu_1}{\partial a_1} & \frac{\partial \mu_1}{\partial b_1} & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{\partial \mu_1}{\partial b_9} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial \mu_n}{\partial a_0} & \frac{\partial \mu_n}{\partial a_1} & \frac{\partial \mu_n}{\partial b_1} & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{\partial \mu_n}{\partial b_9} \end{pmatrix},$$

où n représente les mesures du mouvement de rotation. La solution au problème des moindres carrés non linéaires est obtenue à l'aide de la fonction *lsqcurvefit* dans Matlab, qui est utilisée pour déterminer les paramètres. La figure 5-9 illustre le résultat de l'approximation du polynôme d'interpolation.

Le seuil qui permet de valider l'identification du geste pourrait être déterminé selon la corrélation croisée entre le modèle (données estimées) et trois mesures. Ces dernières sont récupérées selon la procédure introduite au début de cette section. Une corrélation croisée est ensuite appliquée entre le modèle d'identification et chacune de ces mesures. Le maximum

de la corrélation croisée est déterminé pour chaque résultat où il est présenté dans le tableau 5-2.

Tableau 5-2 : Définition du seuil maximum de détection

Acquisitions	1	2	3
Max de corrélation	0.041	0.037	0.0394

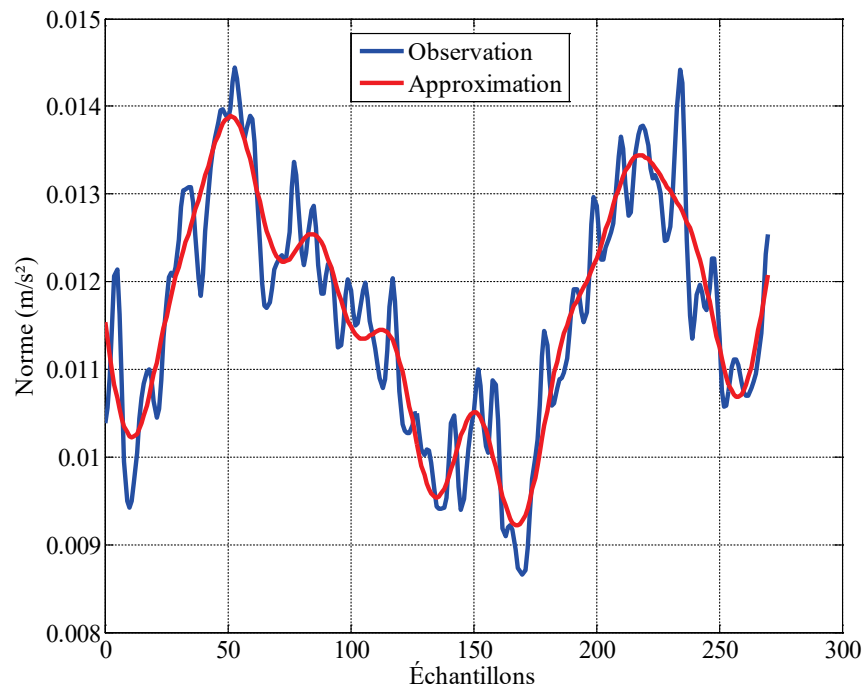


Figure 5-9 : Comparaison entre les données d'approximation et les mesures pour la valeur de $k=9$

À partir de ce tableau, le seuil moyen observé est de 0.039, par ce fait, le mode d'interaction physique est activé si le maximum de la corrélation croisée entre le signal et le

modèle est supérieur ou égal à cette valeur. Par ailleurs, le seuil minimum de pression enregistré par les capteurs FSR est défini par la valeur de deux. Ce seuil est établi à partir de plusieurs expériences avec la semelle, où le geste de basculement est établi pour analyser la pression des capteur FSR avant. Un exemple est présenté à la figure 5-10 lors de cette expérience.

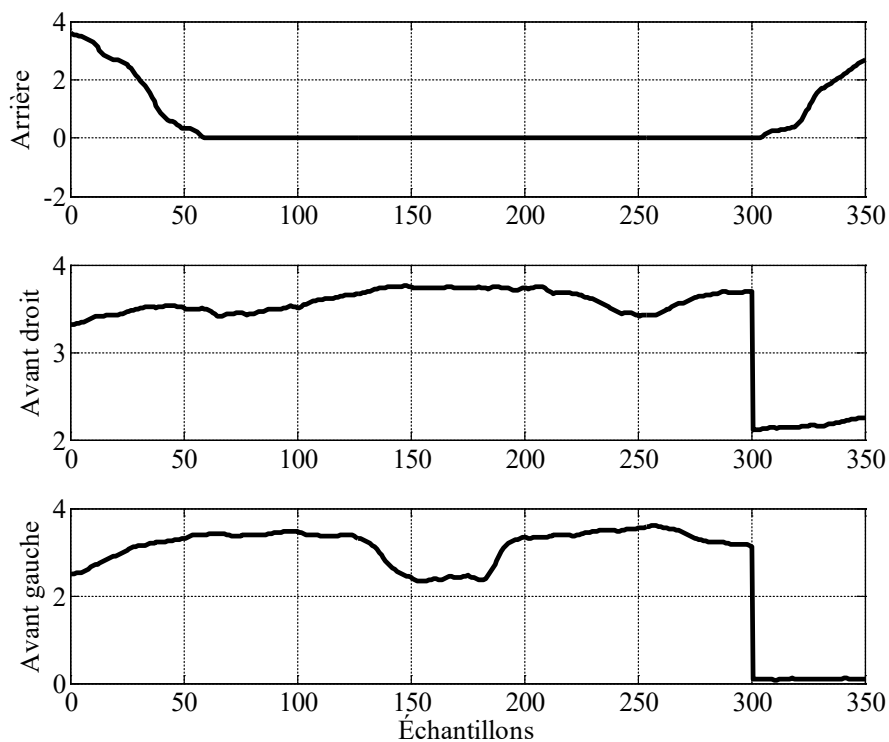


Figure 5-10 : Portion des signaux des trois capteurs FSR

On constate que les données du capteur arrière sont nulles puisque le talon n'est pas en contact avec le sol. Par contre, des valeurs sont observées sur les signaux des capteurs avant ce qui indique une pression vers l'avant du pied. Le seuil minimum pourrait être définie

par la valeur de deux, par ce fait, si une mesure d'un capteur est supérieure à ce seuil cela désigne qu'une pression est établie sur ce capteur FSR. Après avoir défini les paramètres du modèle d'identification et les seuils de validation, ces derniers sont ajoutés à l'algorithme de sélection de mode où il est exécuté en temps réel. Des résultats sont présentés à la section suivante.

5.3.2 Résultats des expérimentations

Afin de valider l'algorithme de sélection, cinq acquisitions ont été pratiquées et sont présentées dans cette section. Il est à noter que ces acquisitions sont différentes de celles qui ont permis de déterminer les seuils et le modèle. Les expériences débutent par le mode de partage des activités où le MPEC se déplace selon le calcul de trajectoire décrit à la section 2.2.3. La pose initiale de la plateforme mobile correspond à 1.56 m en x , 3.24 m en y et 1.22 m en z . La trajectoire est calculée à partir de ce point jusqu'à la pose finale qui a les coordonnées cartésiennes suivantes 2.52 m en x , 3.68 m en y et 1.22 m en z . Une fois la position finale atteinte dans le mode partage des activités, le MPEC attend de recevoir la prochaine commande. À ce moment, le geste pour sélectionner le mode d'interaction physique est exécuté et détecté par l'algorithme. La commande en admittance présentée à la section 4.1.2 est activée et les déplacements sont réalisés en interaction physique à l'aide du capteur de force situé dans la plateforme mobile. La figure 5-12 illustre deux images provenant d'une vidéo. Les signaux des capteurs FSR lors de cette expérience sont présentés à la figure 5-11. On constate que les données du capteur arrière sont nulles pendant un

intervalle de temps, par ce fait, le talon n'est pas en contact avec le sol puisqu'aucune pression n'est enregistrée. Par contre, des pressions sont notées pour les deux capteurs avant, puis elles diminuent. Ceux-ci impliquent que pendant cet intervalle, un basculement vers l'avant du pied est effectué, par conséquent, la première condition de l'algorithme est validée puisque la pression est supérieure à deux. Les mouvements de rotation sont détectés à l'aide du modèle où une corrélation croisée est appliquée pour identifier une correspondance. La figure 5-13 illustre une image instantanée du signal de la norme de l'accéléromètre lors de la rotation du pied et le signal du modèle d'identification.

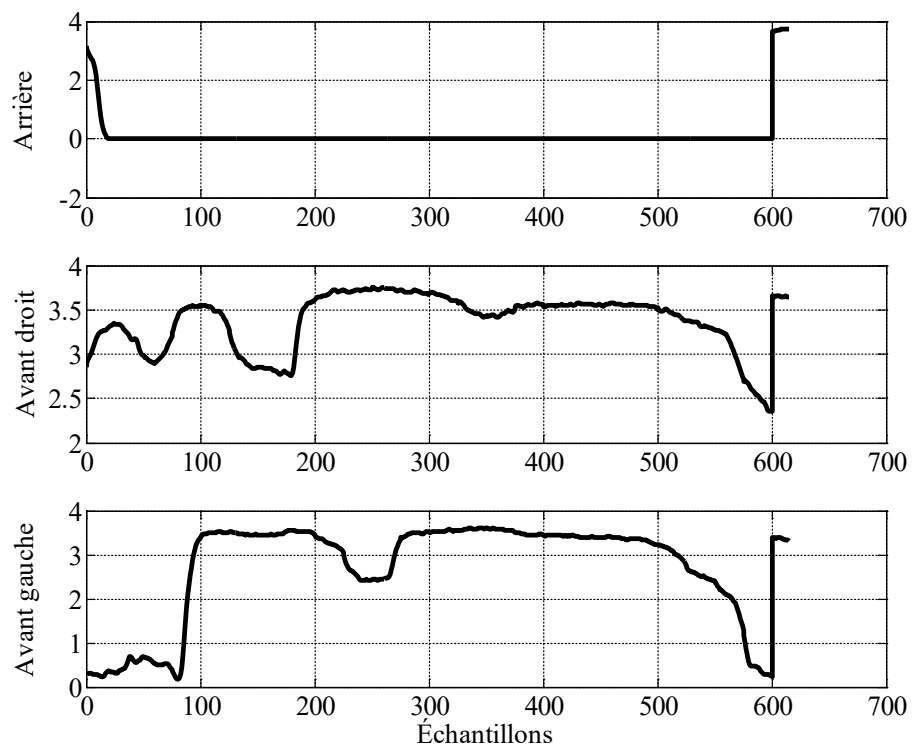
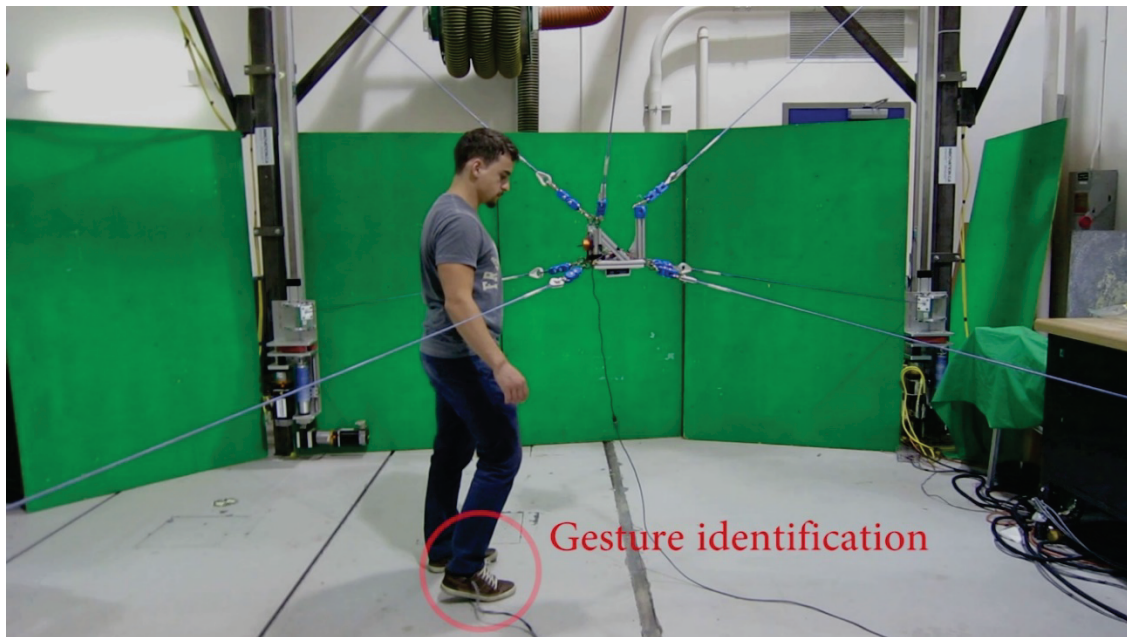
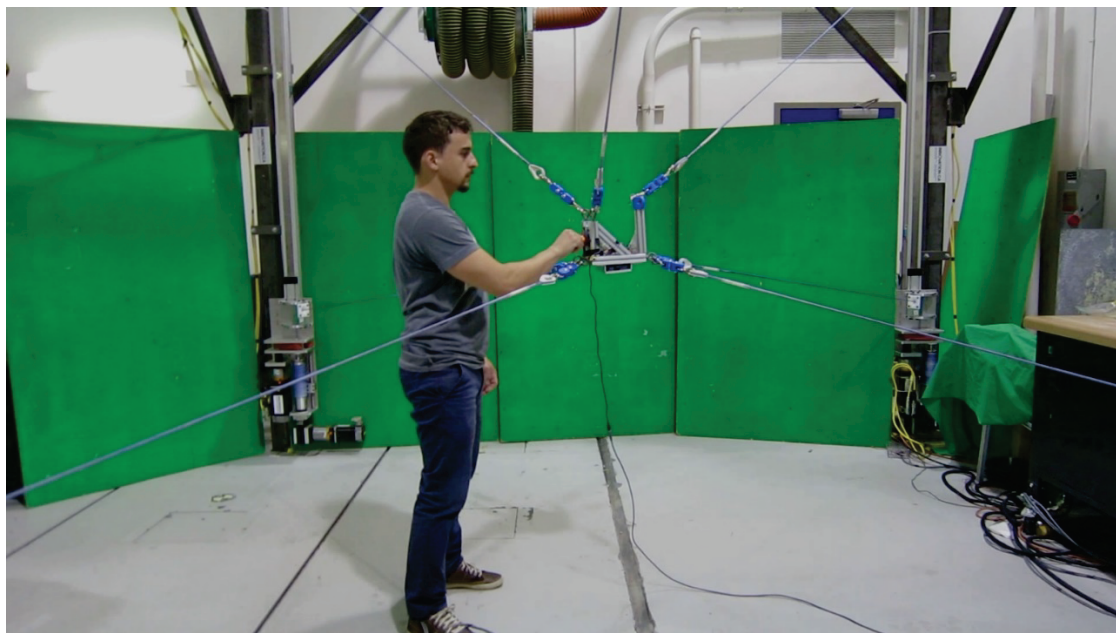


Figure 5-11 : Capteurs FSR de la première expérience



(a) Geste du pied visuellement représenté par un mouvement d'écrasement d'une cigarette



(b) Activation du mode d'interaction physique avec le MPEC

Figure 5-12 : Illustration de la première expérience pour la validation de l'algorithme de sélection de mode

Le résultat de la corrélation croisée, illustré à la figure 5-14, est évalué pour trouver la valeur maximale, ensuite cette valeur est comparée au seuil prédéfini. La valeur maximale enregistrée est égale à 0.0398. Puisque cette valeur est supérieure ou égale au seuil, par ce fait, les mouvements de rotations sont identifiés. Ainsi, la deuxième condition est respectée et le mode d'interaction physique est activé. L'utilisateur se déplace avec le mécanisme à l'aide du capteur de force situé sur la plateforme mobile.

La figure 5-15 présente l'état de la variable qui permet de sélectionner le mode d'interaction. Cette variable générée par l'algorithme est définie par les valeurs 2 et 1 où elle représente respectivement le mode de partage des activités et le mode d'interaction physique. La figure 5-16 illustre le chemin du mécanisme lors de cet expérience. Les deux chemins en rouge et en bleu représentent respectivement la trajectoire parcourue en partage des activités et en interaction physique.

L'expérience a été renouvelée quatre fois afin de tester la constance de fonctionnement de l'algorithme et de l'identification du geste. Le tableau 5-3 présente les résultats obtenus lors du calcul du maximum de corrélation croisée entre les mesures et le modèle. On constate que le geste a été identifié pour les quatre expérimentations puisque le maximum de la corrélation croisée est supérieur ou égale au seuil. À chaque fois l'algorithme exécuté en temps réel a permis d'identifier le geste et de sélectionner le mode d'interaction.

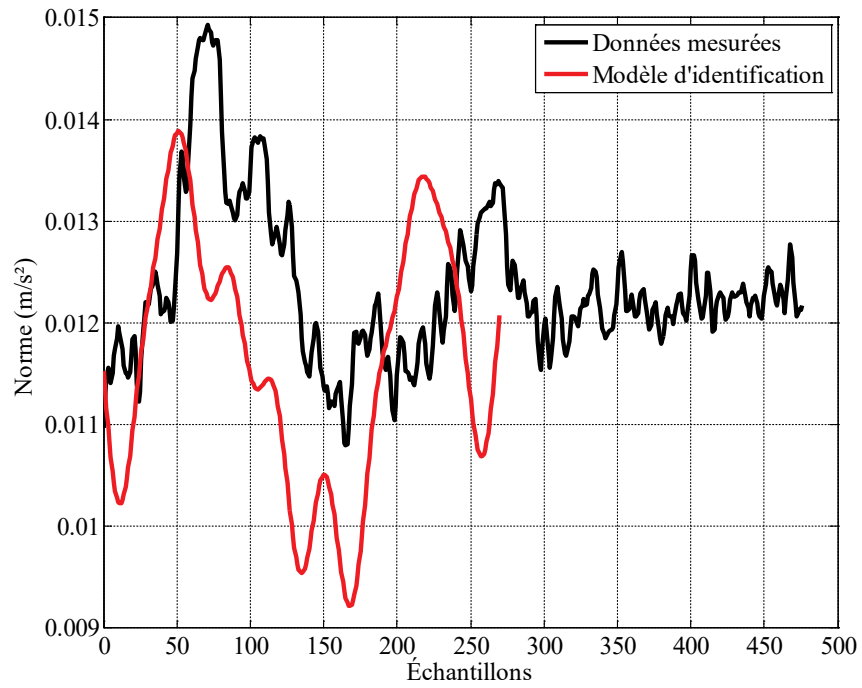


Figure 5-13 : Application de la corrélation croisée entre les données mesurées et le modèle pour la première expérience

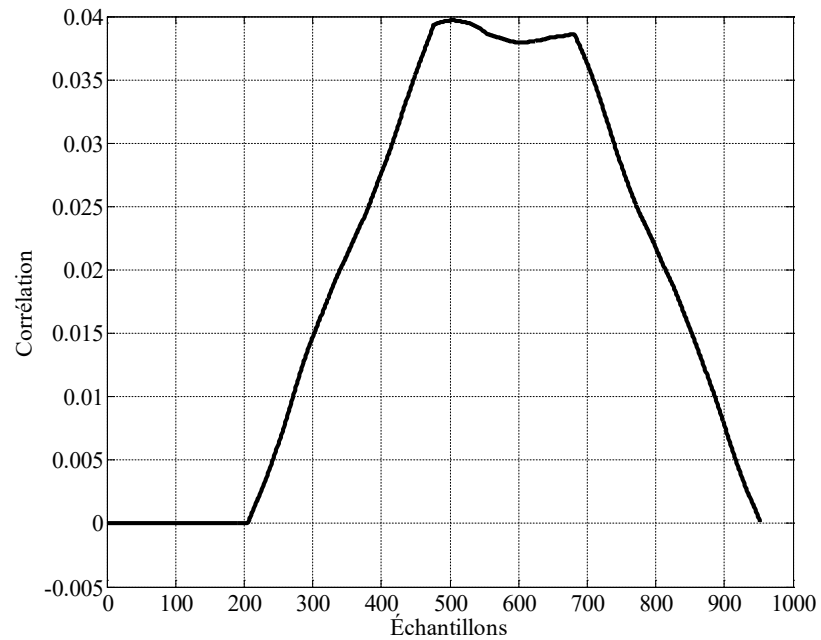


Figure 5-14 : Résultat de la corrélation croisée de la première expérience

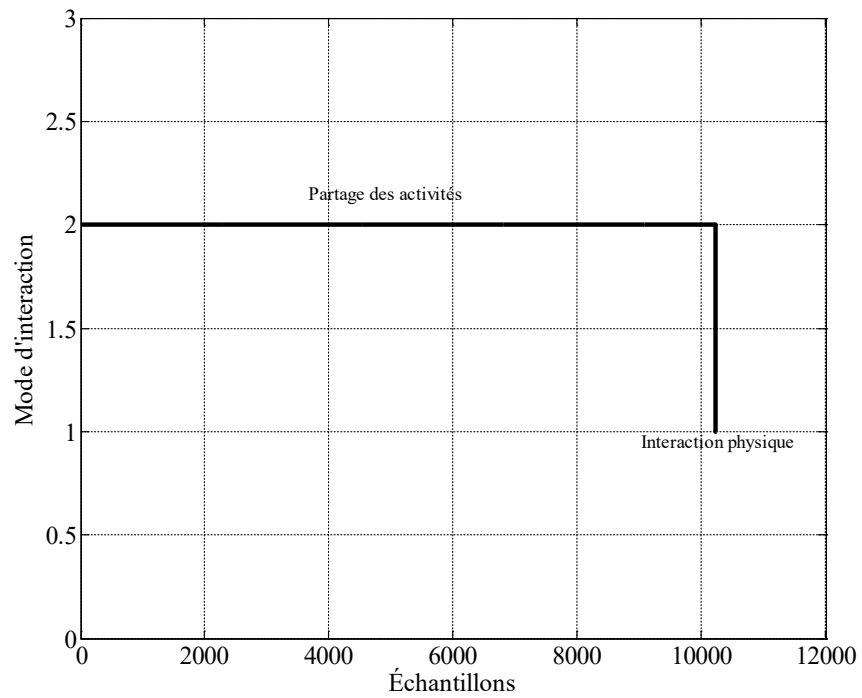


Figure 5-15 : Sélection du mode pendant l'expérimentation

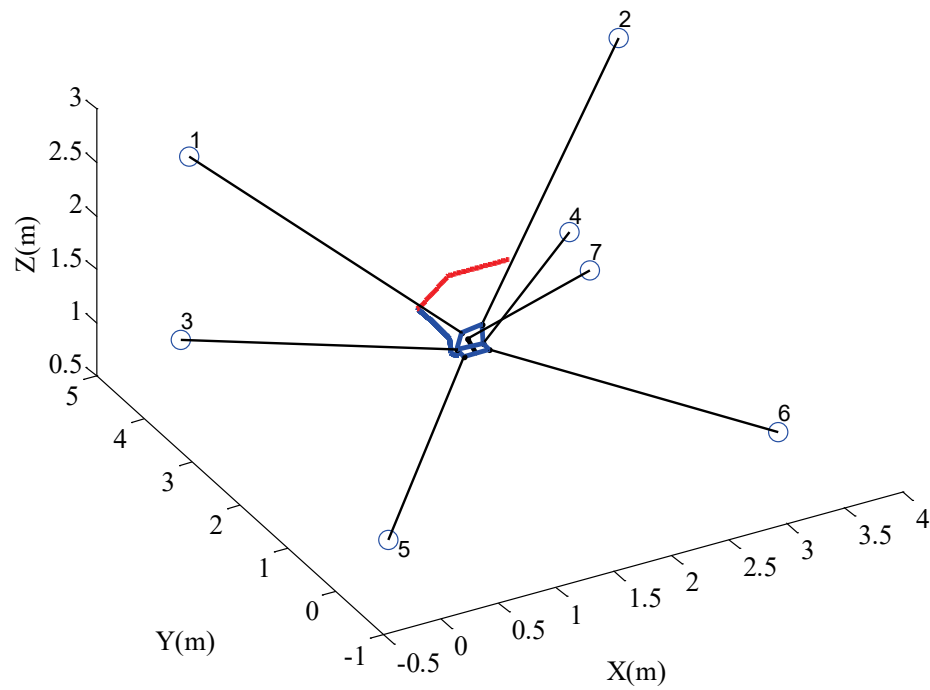


Figure 5-16 : Trajectoire parcourue par le MPEC à $t = 28.18$ s

Tableau 5-3 : Résultats de la corrélation croisée des quatre expériences

Acquisitions	1	2	3	4
Max de corrélation	0.04	0.0397	0.04	0.0398

Afin de différencier entre plusieurs mouvements, quatre différents gestes ont été pratiqués et comparés au modèle d'identification. Le premier geste correspond à marcher en ligne droite sur une petite distance. Le deuxième consiste à pratiquer le geste de rotation du pied, mais avec un mouvement supplémentaire par rapport aux mouvements définis préalablement. En effet, ce dernier est composé d'un basculement vers l'avant du pied et de trois mouvements de rotation effectués selon l'axe vertical (gauche-droite-gauche). Toutefois, dans ce cas le geste inclut le basculement du pied et quatre mouvements de rotation, à savoir gauche-droite-gauche-droite. Dans le troisième geste, une inclinaison verticale est réalisée et enfin, le mouvement de rotation tel que défini est pratiqué, à savoir basculement du pied vers l'avant et geste de rotation représenté visuellement par un mouvement d'écrasement d'une cigarette.

La figure 5-17 illustre la norme d'accélération des gestes. La corrélation croisée est appliquée entre le modèle et l'ensemble des gestes où le résultat est présenté à la figure 5-18. On constate que le seuil du maximum de la corrélation croisée est atteint uniquement vers la fin du calcul, ce qui correspond au dernier geste. Par conséquent, le modèle d'identification permet de différencier entre ces gestes.

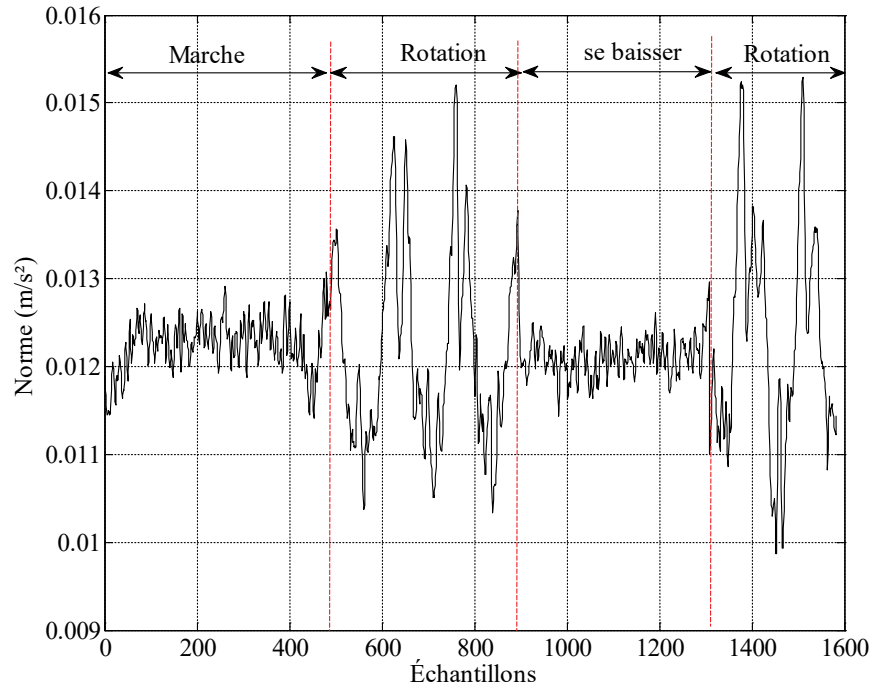


Figure 5-17 : Expérimentation pour différentier entre les gestes

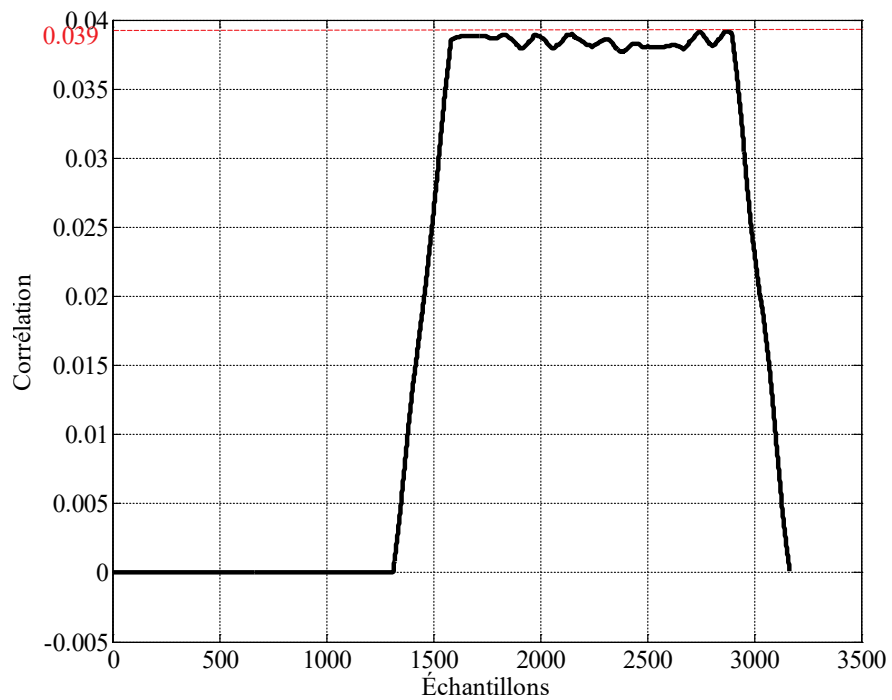


Figure 5-18 : Corrélation croisée entre les gestes

L'algorithme proposé est une solution adaptée qui permet de changer le mode d'interaction en temps réel. Cependant, dans certains cas le geste doit être répété deux à trois fois avant la détection par l'algorithme. Ceci est lié à la première condition qui n'est pas validée à la suite d'interruptions des signaux des deux capteurs FSR situés en avant de la semelle. En effet, pour que la première condition soit confirmée, l'utilisateur doit maintenir le basculement vers l'avant du pied pendant les mouvements de rotation afin de conserver une pression constante sur les capteurs. Cet inconvénient est causé par la pointure et la disposition des capteurs FSR dans la semelle qui ne sont pas ajustées par rapport au pied de l'utilisateur.

5.4 Discussion et conclusion

Un nouvel algorithme de sélection de modes d'interaction est proposé et validé dans ce chapitre. Cet algorithme exécuté en temps réel permet de choisir entre le mode de partage des activités étudié au chapitre 2 et le mode d'interaction physique discuté au chapitre 4. La méthode est basée sur une identification de geste du pied où une semelle instrumentée a été utilisée pour récupérer et analyser les données à travers trois capteurs FSR et un accéléromètre. L'identification de geste est établie à partir d'un polynôme d'interpolation géométrique dans lequel ces paramètres sont déterminés en utilisant la méthode des moindres carrés non linéaires. Cette dernière consiste à estimer les paramètres du polynôme afin de définir une approximation du signal caractérisant le geste. En outre, des expérimentations ont été

pratiquées sur le mécanisme à sept câbles introduit au chapitre 3. Il est à noter qu'une vidéo démontrant le fonctionnement de l'algorithme est proposée avec ces résultats.

Cependant, le nombre réduit de participants ayant expérimenté l'algorithme constitue une limitation dans cette étude. En effet, les tests ont été pratiqués par l'auteur uniquement puisqu'un certificat d'éthique est nécessaire pour considérer d'autres participants. Bien que les résultats suggèrent que l'algorithme peut identifier le geste et sélectionner le mode d'interaction, des expériences sur un ensemble de participants permettront de compléter la validation de l'algorithme. En outre, d'autres gestes et activités peuvent être aussi testés afin de tester davantage la différenciation des gestes.

L'utilisation d'une semelle instrumentée pour le changement de mode d'interaction appliqué en industrie constitue une première dans le domaine. Cette application permet d'augmenter la productivité industrielle en sélectionnant un mode d'interaction de manière simple, rapide et intuitive. L'étude proposée a permis de démontrer la nécessité d'un tel système dans un espace hybride et la facilité de conception de l'outil de mesure à savoir, la semelle instrumentée.

CHAPITRE 6

RECOMMANDATIONS POUR LE SYSTÈME INTERACTIF

Ce chapitre présente les derniers éléments proposés dans le système interactif présenté à la figure 1-14. Il traite d'autres avenues qui restent à étudier comme l'évaluation de la fatigue, la reconnaissance des activités et l'intégration de l'évolution des troubles musculosquelettiques liées à la posture. Un casque de sécurité est introduit, qui permet d'évaluer l'état mental et de reconnaître les activités pendant l'interaction, afin de calculer un risque d'accidents. Par ailleurs, un algorithme permettant l'introduction et la gestion de ces éléments est proposé, ainsi que des expérimentations sur une plateforme hybride. Ces dernières expérimentations ont permis d'établir des résultats préliminaires sur la reconnaissance des activités en utilisant un vêtement de protection individuels intelligents.

6.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, des algorithmes et des stratégies de commande ont été introduits. Ils permettent d'une part l'amélioration des gains de production à travers l'interaction humain-robot et d'autre part, l'amélioration de la sécurité de l'opérateur pendant cette interaction. Cependant, d'autres éléments doivent être pris en considération afin de diminuer le risque d'accident et d'accroître la sécurité de l'opérateur. Par ce fait, il est nécessaire d'identifier un critère qui permet d'évaluer les situations critiques comme dans le cas où l'opérateur nécessite une assistance. En effet, d'après l'étude dans [41], près de 20% des accidents sont souvent occasionnés par une perte d'attention du travailleur comme la fatigue, la somnolence et la baisse de concentration qui augmentent le risque d'accident lors d'une interaction avec une machine. Par ailleurs, les coûts engendrés suite à un accident sont largement supérieurs à ceux liés à une prévention et une gestion du risque.

Le défi serait donc de proposer un système qui maximise les gains de production et minimise le risque d'accident. Il peut être défini par un calcul de risque d'accident où la situation est examinée à travers trois facteurs à savoir, la distance entre l'opérateur et le manipulateur, l'occurrence ainsi que la reconnaissance d'activités. Avant de présenter la méthode de calcul de risque, il convient d'identifier l'outil de mesure pour la reconnaissance d'activités et l'évaluation de l'opérateur.

6.2 Outils pour l'évaluation de l'opérateur

La reconnaissance d'activités constitue un facteur important dans le calcul de risque qui permet de nous renseigner sur la tâche et le suivi du procédé industriel. Le capteur caméra est largement utilisé pour la détection et la reconnaissance d'activité [160, 161]. Rivera-Bautista et al. [162] présentent un système utilisant une Kinect de Microsoft. Cette approche utilise l'information 2D en provenance de la caméra pour détecter le visage de la personne et l'information 3D est utilisée pour détecter et segmenter le corps de la personne. Par la suite, un histogramme de couleur de la silhouette est construit afin de permettre le suivi. D'autres approches présentées dans [163, 164] combinent à la fois la caméra et un télémètre laser pour la détection et le suivi de personnes.

Cependant, pour les mêmes raisons mentionnées au chapitre précédent, l'utilisation d'une caméra pour la reconnaissance d'activités pourrait présenter certains inconvénients [131] comme les conditions d'éclairage et les réflexions lumineuses qui peuvent affecter la qualité des images et donc le taux de reconnaissance des activités. Par ce fait, l'équipe de recherche propose deux systèmes basés sur une centrale inertielle (IMU), le premier est placé dans une semelle instrumentée telle que présentée à la section 5.2.1. Le deuxième capteur est situé dans un casque de sécurité instrumenté transparent, non invasif et léger [48]. En effet, la masse ajoutée par les composantes électroniques à l'intérieur du casque est suffisamment faible pour ne pas être perceptible par l'opérateur (environ 10% de la masse du casque). Ce système, illustré à la figure 6-1, contient des électrodes sèches EEG (électro-

encéphalographie) pour mesurer l'activité cérébrale et une centrale inertielle (IMU) à neuf degrés de liberté afin de reconnaître les gestes de la tête.

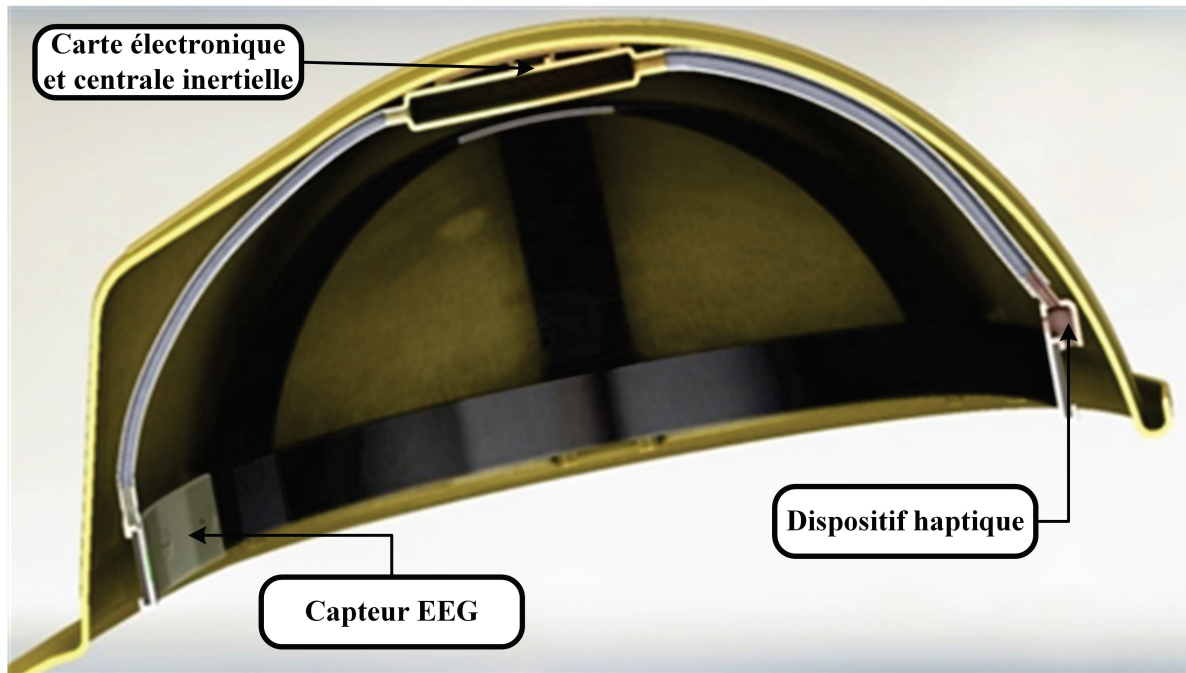


Figure 6-1 : Dessin en coupe du casque de sécurité instrumenté

Cette dernière contient un accéléromètre, un magnétomètre et un gyroscope, soit trois degrés de liberté pour chaque capteur. Afin de maintenir la concentration de l'utilisateur, le casque intelligent est équipé d'un dispositif haptique pour alerter l'opérateur lorsque le niveau de risque dépasse le seuil prédéfini. En outre, il est équipé d'une carte électronique située à l'intérieur du casque qui comprend un microcontrôleur PIC24.

6.3 Algorithme global

L'algorithme global, présenté à la figure 6-2, est exécuté en temps réel pendant l'interaction avec le manipulateur selon les étapes suivantes.

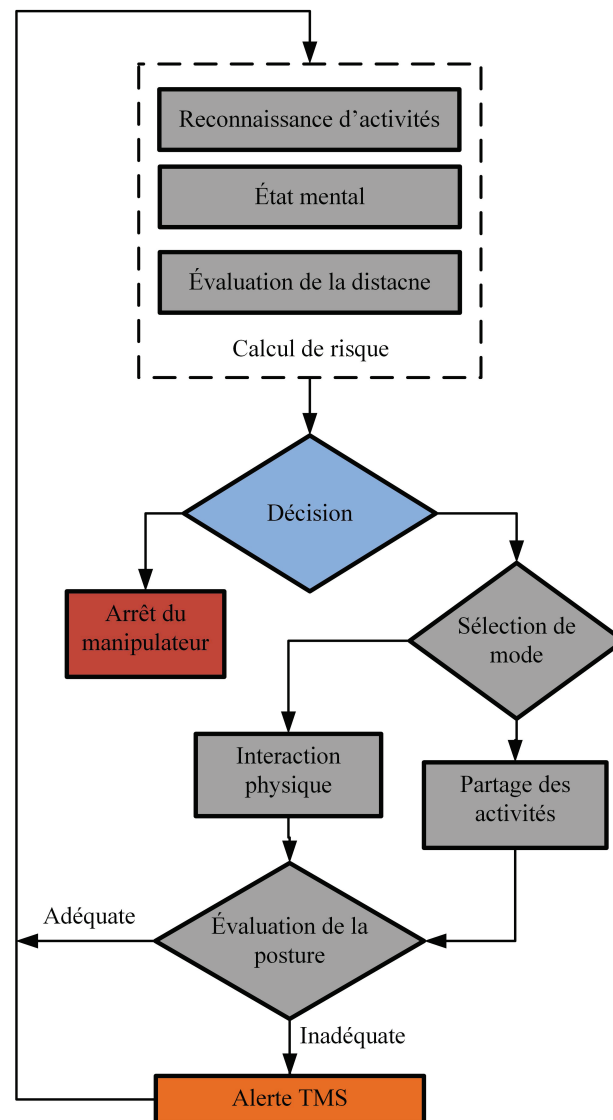


Figure 6-2 : Proposition d'un algorithme avec évaluation de l'opérateur et sélection de mode

Tout d'abord, un risque d'accident est calculé à partir de données récupérées du casque instrumenté. Les informations obtenues renseignent sur la fatigue de l'opérateur, la position ainsi que l'activité. Cette dernière permet de détecter une anomalie dans l'ordonnancement d'une séquence d'activité au cours de la coopération. La méthode de calcul du risque d'accident est présentée à la section suivante.

En fonction des résultats, la deuxième étape est la prise de décision entre l'arrêt du manipulateur si le niveau de risque est élevé, ou la continuité du procédé si aucune demande de changement de mode n'est détectée. Cette dernière consiste à la détection du geste de pied qui permet de sélectionner la mode interaction physique comme présentée au chapitre 5. À partir du mode d'interaction physique, la stratégie de commande proposée au chapitre 4 est exécutée afin de gérer les interférences entre les câbles [165]. Dans le mode de partage des activités, la solution abordée au chapitre 2 est activée afin de générer des trajectoires sécuritaires et de permettre une interaction sans collision [166].

La posture est évaluée dans les deux modes d'interaction afin d'alerter l'opérateur avec des vibrations au niveau du casque de sécurité à partir du dispositif haptique, et ceci afin d'éviter la progression des troubles musculosquelettiques. L'évaluation de la posture est effectuée à l'aide des deux vêtements intelligents à savoir, le casque et la semelle instrumentée. Cette partie a été étudiée et expérimentée par une autre équipe de recherche [167-169].

6.4 Calcul de risque d'accident

Afin de proposer une méthode optimale, trois éléments doivent être considérés dans le calcul de risque. La reconnaissance d'activités, qui constitue le premier élément, permet de définir un niveau de sévérité attribué à chaque activité selon le danger. Le deuxième élément est le nombre de répétitions du mouvement qui pourrait être considéré comme un début de fatigue [48, 170]. L'évaluation de la distance entre le manipulateur et l'opérateur est le dernier facteur à prendre en considération dans le calcul de risque. En effet, plus la distance est grande plus la probabilité de collisions est petite. Par conséquent, l'équation permettant d'évaluer le risque d'accident est représentée comme suit :

$$Risque = P \times O \times S, \quad (6-1)$$

où S représente la sévérité et O est l'occurrence de l'activité détectée. La valeur de l'occurrence augmente dans le cas d'un mouvement critique produit par l'utilisateur comme, la somnolence. P représente la probabilité du risque de collisions qui est calculée par rapport à la distance entre l'opérateur et le manipulateur.

À partir des capteurs EEG introduits dans le casque, le niveau de fatigue [171] et du stress [172] sont détectés et classifiés en trois groupes, comme illustré la figure 6-3, à savoir : l'état mental à haut risque, l'état mental à risque moyen et l'état mental à faible risque. Le niveau de sévérité est déterminé en multipliant le résultat de l'état mental ainsi que de la

reconnaissance des activités. Cette dernière est établie en utilisant le capteur IMU situé à l'intérieur du casque de sécurité et en pratiquant des expérimentations pour compléter une base de données des différentes activités. Le tableau 6-1 illustre le niveau de sévérité en fusionnant des données de l'IMU et l'EEG.

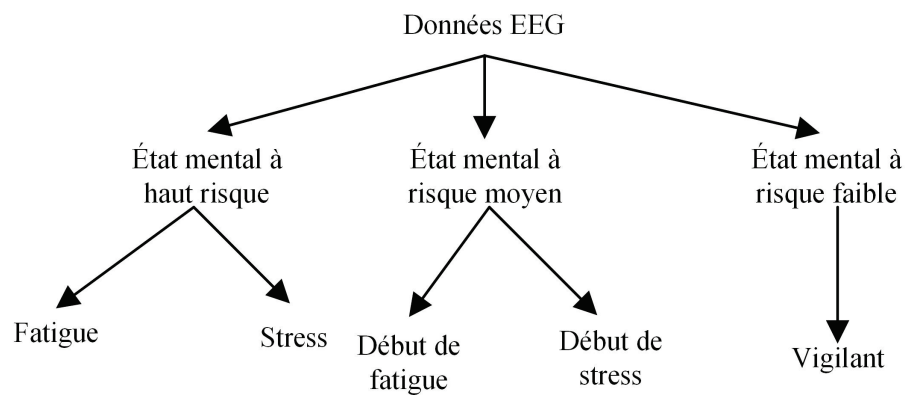


Figure 6-3 : Les catégories retenues pour évaluer l'état mental

Tableau 6-1 : Détermination du niveau de sévérité

	Vigilant (1)	Début de fatigue ou de Stress (2)	Fatigue/Stress (3)
Le torse en déplacement (1)	Bas (1)	Bas (2)	Moyen (3)
Le torse fixe (2)	Bas (2)	Moyen (4)	Haut (6)
Somnoler (3)	Moyen (3)	Haut (6)	Haut (9)

Dans cette étude, l'objectif était d'explorer la possibilité d'utiliser un casque de sécurité pour l'évaluation de l'opérateur [48]. Trois activités ont été définies pour les expérimentations correspondant à trois niveaux de sévérité, à savoir le niveau bas, moyen et haut où un score de 1 à 3 est attribué pour chaque niveau selon l'activité. Par exemple, somnoler est une activité qui augmente le facteur de risque d'accident, par ce fait, le score attribué est de 3. De même que les scores attribués à l'état mental où il est défini selon le niveau de fatigue et de stress.

6.5 Expérimentation sur la plateforme hybride

Cette section présente la plateforme hybride où les expérimentations ont été pratiquées, le déroulement des expériences et les résultats sur la reconnaissance d'activités. Il est à noter qu'uniquement le casque de sécurité a été utilisé pour les expérimentations qui se sont déroulées au laboratoire LAR.i de l'Université du Québec à Chicoutimi.

6.5.1 Plateforme hybride pour l'assemblage en coopération (FMS)

Afin de simuler l'environnement industriel, l'équipe de recherche propose une mini-usine nommée FMS pour « *Flexible Manufacturing System* » [75], illustrée à la figure 6-4. Cette plateforme contient un automate programmable industriel, un convoyeur, trois

distributeurs de pièces, un classeur à trois niveaux, des capteurs optiques et de proximités, des vérins pneumatiques et un robot industriel.

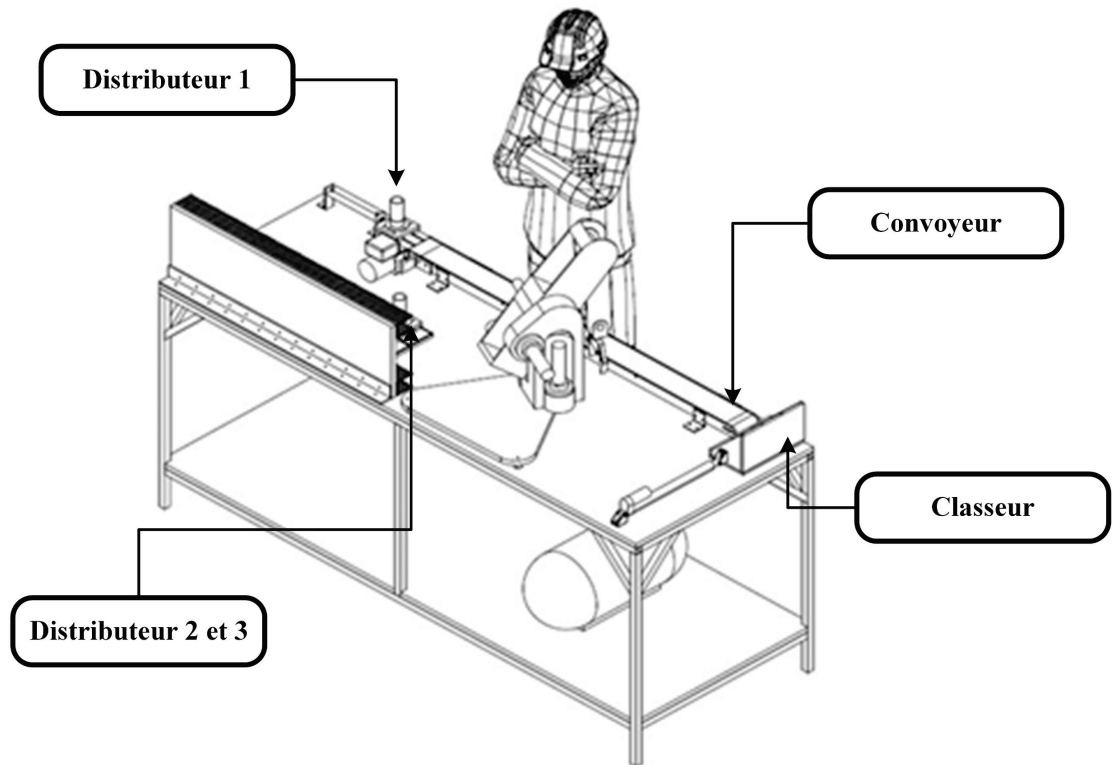


Figure 6-4 : Plan 3D de la plateforme hybride

Un assemblage automatique est programmé sur l'automate afin de permettre d'expérimenter une tâche de manutention en coopération avec l'opérateur. Cette tâche consiste à assembler deux différents types de pièces, soit en plastique ou en métal. Le processus d'assemblage se déroule comme suit : tout d'abord, le vérin pneumatique du premier distributeur est sollicité pour envoyer une première pièce sur le convoyeur. Ensuite, le capteur de détection de métaux détermine la nature de la pièce (métal ou plastique). Par

rapport au type de pièce détecté, une commande est envoyée au vérin du deuxième ou troisième distributeur.

La prochaine étape consiste à l'assemblage des pièces avec le manipulateur. En effet, ce dernier va récupérer la pièce du deuxième ou troisième distributeur avec la pince pour ensuite, l'assembler à la première pièce qui se trouve sur le convoyeur. Enfin, la dernière étape comprend la vérification et la validation des pièces assemblées. Cette dernière confirme la réussite de l'assemblage ainsi que la bonne conformité des matériaux assemblés. Selon le résultat de cette vérification, le classeur est positionné sur l'un des trois niveaux. Les deux premiers niveaux correspondent à l'assemblage de types métal et à l'assemblage de types plastiques. Le dernier niveau du classeur correspond aux erreurs d'assemblages, comme des pièces non assemblées ou des pièces non conformes.

6.5.2 Déroulement des expériences avec collaboration de l'opérateur

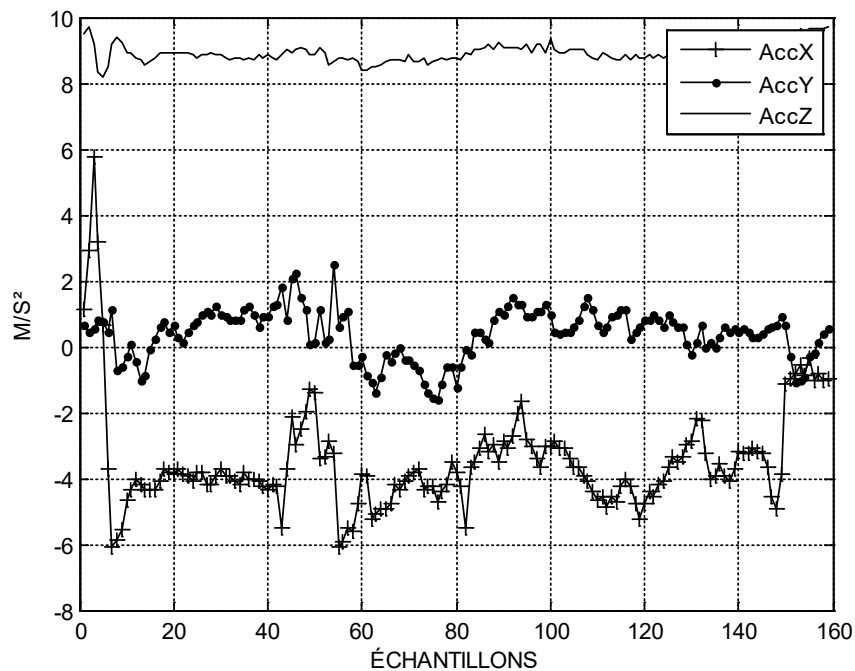
Afin de reconnaître les activités durant l'interaction dans une cellule hybride, il est nécessaire de compléter une base de données des différents mouvements. Les participants coopèrent avec le robot dans l'assemblage, en alimentant les distributeurs et en gérant les erreurs d'assemblages. Toutefois, il n'y a pas eu de formation ou d'entraînement spécial avant l'expérience. En effet, une simple démonstration a été donnée aux participants afin de comprendre les mouvements à effectuer et leurs séquences. Quatre étudiants hommes ont porté le casque instrumenté et ont pratiqué l'expérience qui se déroule en trois séquences. À

noter que ces expérimentations ont eu l'approbation du comité d'éthique de l'Université du Québec à Chicoutimi présenté à l'annexe 1.

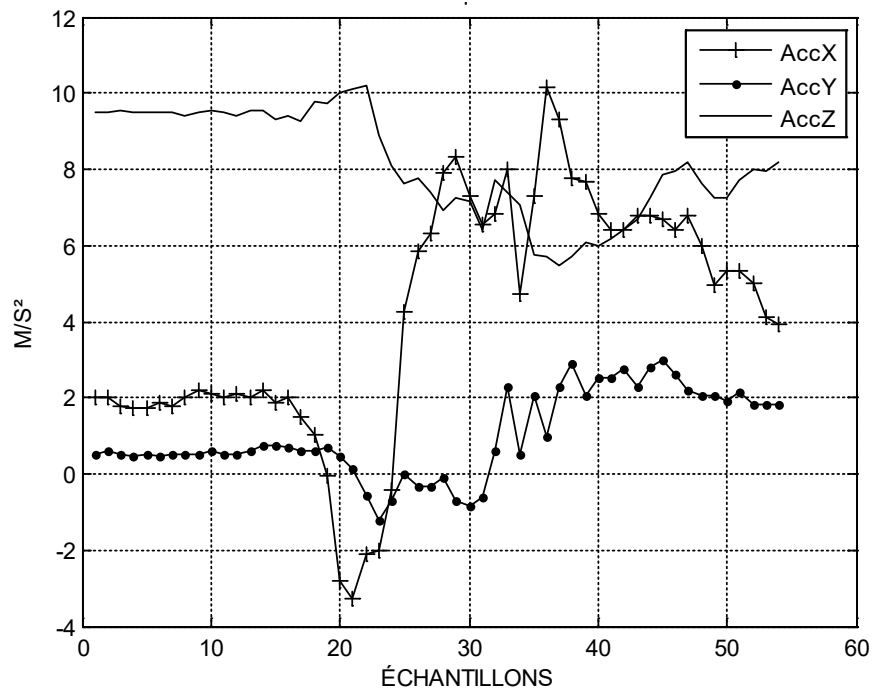
Dans la première séquence, l'intervenant remplit les distributeurs avec les différents types de pièces. Ensuite, le robot assemble les pièces selon le processus d'assemblage décrit dans la section 6.5.1. La deuxième séquence consiste à esquiver le bras manipulateur afin d'éviter la collision. Enfin, dans la dernière séquence, le participant se baisse pour atteindre une boîte avec des nouvelles pièces qui serviront au remplissage des distributeurs. Chaque séquence est répétée trois fois pour chaque participant, soit un total de douze acquisitions par activité qui seront utilisées pour l'analyse et le traitement. Le signal provenant de l'IMU (centrale inertielle) est récupéré sur une tablette Android à l'aide d'une application et d'une transmission Bluetooth. Ces mesures sont collectées à une fréquence de 50 Hz qui est suffisante pour la reconnaissance d'activités liées au mouvement de la tête. Une analyse de la variance ANOVA est appliquée sur les axes x et z de l'accéléromètre afin de reconnaître et de différencier les activités. Par ce fait, l'hypothèse nulle est vraie si l'axe x et z ne peuvent pas être différenciés, dans ce cas le p -value devrait être supérieur à 0.1. Cependant, avant cette analyse, un procédé statistique a été appliqué sur toutes les données (12 données par activité). Il consiste à calculer la moyenne, la variance, la déviation standard et l'énergie de chaque activité. Ce procédé permet de différencier quantitativement les différentes activités et de trouver les caractéristiques appropriées. En outre, il pourrait aussi représenter une solution pour l'extraction de données destinées à un algorithme d'intelligence artificielle.

6.5.3 Résultats de l'expérience

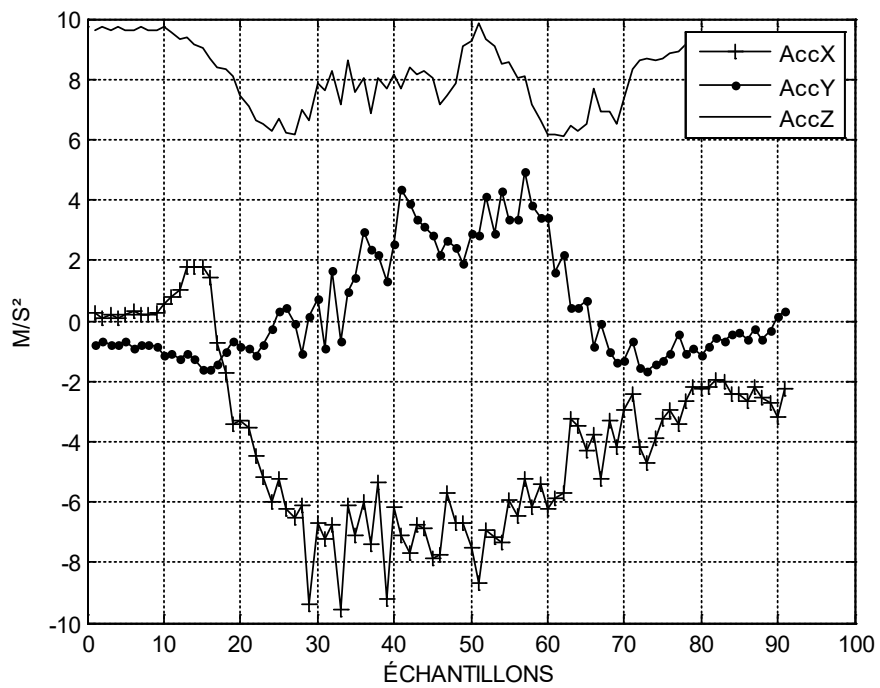
La figure 6-5 illustre les résultats de chaque activité (séquence) provenant d'un participant. Chaque activité est représentée dans une image différente, la (a) pour le « remplissage des distributeurs », (b) illustre l'activité « esquive » et l'image (c) présente la séquence « se baisser ». Les trois axes x, y, z du capteur d'accélération sont représentés pour chaque activité. La figure 6-6 illustre le résultat de l'analyse de variance ANOVA appliquée sur l'axe x et l'axe z de l'accéléromètre.



(a) Remplissage des distributeurs

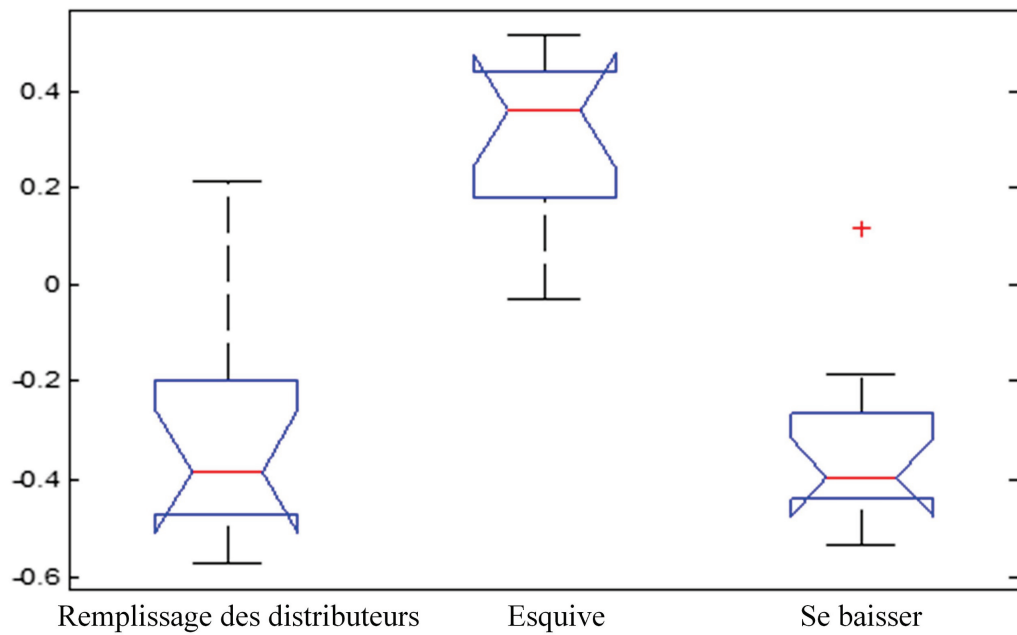


(b) Esquive

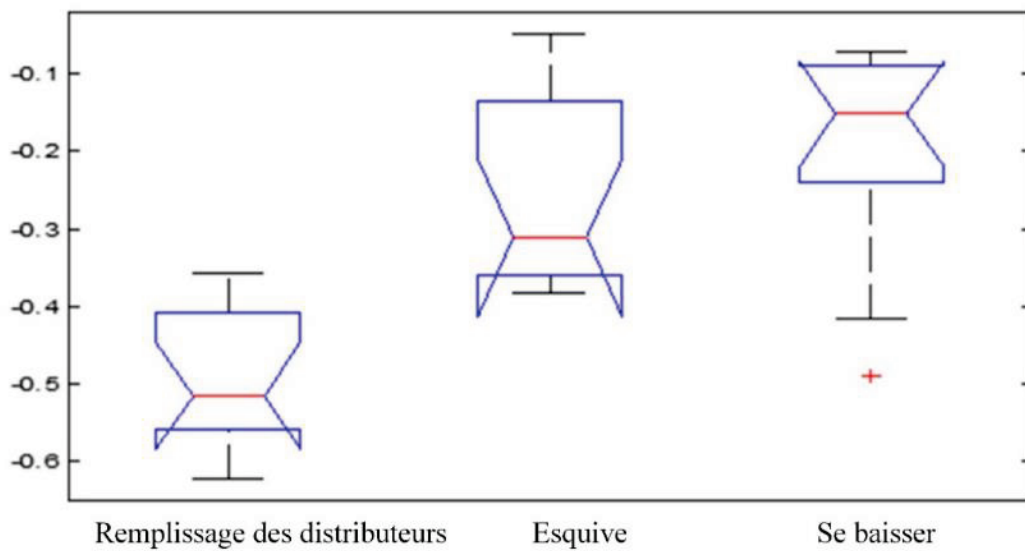


(c) Se baiser

Figure 6-5 : Signal d'accélération de chaque activité



(a) Analyse de l'accélération en axe x



(b) Analyse de l'accélération en axe z

Figure 6-6 : Normalisation de l'accélération en utilisant ANOVA

Le p-value des axes x et z sont respectivement à 2.89×10^{-10} et 8.71×10^{-7} , ceux-ci indiquent qu'il y a une forte hypothèse contre l'hypothèse nulle. Par conséquent, les axes x et z de l'accéléromètre peuvent distinguer respectivement les séquences « esquive » et « se baisser » des autres activités. À partir de ces résultats, les activités sont classées et des scores sont attribués selon l'impact sur le risque d'accident. Ces scores sont ensuite fusionnés avec ceux des données de l'état mental pour calculer le niveau de sévérité. Enfin, le calcul de risque d'accident est déterminé à partir de l'équation (6-1).

6.6 Conclusion

Une technologie basée sur un casque de sécurité instrumenté a été présentée dans ce chapitre, un système qui permet d'évaluer la situation de l'opérateur pendant l'interaction. L'aspect traité dans ce chapitre est la reconnaissance d'activités où des expérimentations ont été pratiquées sur une plateforme hybride afin de valider partiellement cet aspect. En outre, une analyse de la variance ANOVA a été appliquée sur les résultats afin d'identifier les axes de l'accéléromètre et différencier les activités. L'axe x de l'accéléromètre peut être utilisé pour identifier une esquive des autres activités, et l'axe z peut être utilisé pour reconnaître l'inclinaison de l'opérateur pour récupérer un objet. Une première recommandation consiste à étudier et mettre en œuvre une méthode permettant la reconnaissance en temps réel comme les réseaux de neurones [173] ou un modèle de Markov caché (HMM) [174] qui pourrait être utilisé pour la classification des activités. D'autres approches d'identification des signaux,

comme proposée au chapitre 5, sont à considérer aussi pour différencier les signaux de chaque activité.

La classification de l'état mental à travers l'EEG est une étape importante et nécessite une attention particulière dans un projet d'interaction. En effet, les particularités du signal EEG rendent son traitement complexe puisqu'il est faible et sensible aux bruits. Ces dernières, pourraient accroître en raison de l'environnement industriel. En outre, les performances de classification sont aussi sensibles à plusieurs facteurs externes et internes comme la température ou la transpiration de l'utilisateur. Une première étude est proposée par l'équipe de recherche où le niveau de fatigue est évalué en détectant le clignement des yeux [175] à travers l'EEG. La deuxième recommandation serait la continuité des travaux sur une méthode de classification de l'état mental dédiée à l'interaction en industrie.

Les deux outils de mesure, à savoir la semelle et le casque, permettent respectivement d'évaluer l'utilisateur en temps réel sur la posture et le risque d'accident pendant l'interaction. L'algorithme interactif qui gère cette évaluation est proposé dans ce chapitre et pourrait améliorer la sécurité, réduire les troubles musculosquelettiques et ainsi améliorer les conditions de travail et la productivité. Toutefois, l'intégration finale est nécessaire pour la validation de l'algorithme et constitue la dernière recommandation pour le système interactif.

CHAPITRE 7

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS



Jorge Cham

7.1 Conclusion générale

Ce projet de thèse a apporté plusieurs contributions notamment la proposition d'un système interactif permettant d'améliorer la sécurité de l'opérateur et l'intuitivité des mouvements. En outre, le système proposé s'installe et s'adapte sur les mécanismes industriels sans apporter de modification dans la structure mécanique en utilisant des vêtements intelligents. Dans le cadre de ce projet de recherche, deux articles de conférences, deux affiches (poster) et un article de journal ont été publiés. Un autre article de journal a été soumis en février 2018 et deux autres articles sont aussi en cours de préparation pour une prochaine soumission. Au total huit publications dont sept comme premier auteur et une comme second auteur. Par ailleurs, il est important de noter que la majorité des résultats proposés dans cette thèse ont été mis en œuvre à travers des expérimentations sur un mécanisme parallèle entraîné par sept câbles. Un résumé des contributions de cette thèse est présenté dans les paragraphes suivants.

Le chapitre 1 présente l'introduction générale et la problématique du projet de recherche. De plus, le système interactif et l'originalité de la thèse sont aussi abordés dans ce chapitre.

Le chapitre 2 traite une méthode de génération de trajectoires sécuritaires dans le cas de partage des activités de production. Cette approche prend en considération la géométrie déformable de l'obstacle, l'environnement dynamique ainsi que les contraintes cinématiques

et géométriques du manipulateur. Un modèle de réseau de neurones a été proposé pour créer des points de passage dans l'intention est de contourner les obstacles. Afin de relier ces points ainsi que les positions initiale et finale, un polynôme quintique (de degré cinq) est utilisé pour calculer la trajectoire. Par ailleurs, cette trajectoire est optimisée à l'aide de la méthode des moindres carrés afin de réduire la longueur du chemin. Le chapitre s'est conclu en simulant un espace hybride où l'opérateur coopère avec le manipulateur dans une tâche d'assemblage. Les résultats de ces simulations indiquent que l'approche proposée est en mesure de générer des trajectoires en évitant les collisions avec l'humain dans un espace hybride dynamique.

Le chapitre 3 introduit le mécanisme parallèle entraîné par sept câbles utilisé lors des simulations et des expérimentations dans le cadre de cette thèse. Il débute par une discussion sur les méthodes de calcul de distance puis présente les modèles géométrique et cinématique du MPEC. En outre, une nouvelle méthode de calcul de distance minimale entre les câbles est proposée. Elle prend en considération les contraintes physiques des câbles en appliquant des conditions où la solution a été formulée en un problème d'optimisation non linéaire. Ce dernier est résolu avec l'approche de Karush-Kuhn-Tucker (KKT). La méthode de calcul a été expérimentée et validée sur le mécanisme entraîné par sept câbles, ainsi, des résultats sont proposés à la fin de ce chapitre.

Le chapitre 4 discute d'une commande interactive avec une gestion des interfaces entre les câbles. La stratégie permet de gérer le point de collision sans provoquer de croisement ni de relâchement de l'un des câbles lors de l'interaction physique. La méthode,

basée sur un modèle en admittance, détermine une force virtuelle afin d'éviter de traverser le plan d'interférence. Cette force est calculée à partir d'un gradient et d'une fonction logistique afin de définir respectivement la direction et l'amplitude de cette force. Deux solutions mathématiques sont proposées pour le calcul de la direction de la force : la première prend en compte les translations et les rotations du mécanisme. La deuxième solution permet de gérer les interférences en tenant compte uniquement des translations de la plateforme mobile. À la fin de ce chapitre, des simulations sont proposées pour valider la première solution ainsi que des expérimentations sur le MPEC à sept câbles pour valider la deuxième solution.

Le chapitre 5 porte sur un algorithme qui permet de sélectionner entre deux modes d'interaction, à savoir le partage des activités et l'interaction physique. La sélection du mode est déterminée à l'aide d'une identification de geste du pied à travers une semelle instrumentée comportant trois capteurs FSR et un accéléromètre. Le geste est différencié par rapport à d'autres à l'aide d'un modèle d'identification où ce dernier est établi à partir d'un polynôme d'interpolation géométrique. Les paramètres du polynôme sont estimés en utilisant la méthode des moindres carrés non linéaires à partir d'observations qui représentent les données du signal caractérisant ce geste. Cette approximation permet une identification en temps réel et la sélection du mode d'interaction physique. Ce chapitre se termine avec des expérimentations sur le mécanisme à sept câbles.

Bien que le système interactif présenté au chapitre 1, dont les différentes parties ont été abordées à travers les chapitres 2, 3, 4 et 5, permet de répondre aux nouveaux besoins du

secteur industriel, d'autres aspects peuvent être ajoutés afin de proposer une solution complète. Ainsi, le chapitre 6 propose des avenues qui restent à étudier et à intégrer dans le système interactif. Il introduit les aspects de reconnaissances d'activités, d'évaluation de l'état mental et l'évolution des troubles musculosquelettiques liées à la posture. Un casque de sécurité instrumenté incluant une centrale inertielle et des capteurs EEG a été présenté. Cet outil permet d'évaluer la situation de l'opérateur en temps réel pendant l'interaction avec le manipulateur. En outre, un nouvel algorithme incluant les différents aspects est aussi proposé dans ce chapitre. Ce dernier se conclut par des expérimentations sur une plateforme hybride pour l'assemblage en coopération où plusieurs intervenants ont participé aux expériences. Pour identifier les axes de l'accéléromètre et différencier ces activités, une analyse de la variance ANOVA a été appliquée sur les acquisitions, ce qui a permis de valider partiellement la reconnaissance d'activités. Puisque la structure de la thèse est composée de chapitres, les suggestions de travaux futurs sont présentées pour chacun d'eux à la section suivante.

7.2 Recommandations pour chaque chapitre

À travers les résultats obtenus dans les différents chapitres, certains points pourraient être approfondis dans les stratégies et méthodes abordées aux chapitres 3, 4 et 5. Quant au chapitre 2, les futurs travaux seraient d'expérimenter la méthode de génération de trajectoires sur un manipulateur et d'analyser les résultats.

Des améliorations pourraient être apportées à la méthode de calcul de distance minimale au chapitre 3. En effet, certaines hypothèses ont été émises pour la modélisation géométrique et cinématique du MPEC. La masse et le diamètre des câbles n'ont pas été considérés ainsi que la perte de tension provoquant des affaissements. Une première amélioration serait de tenir compte de cet affaissement dans le calcul de distance entre les câbles. Une deuxième amélioration pourrait être l'étude d'une approche de distribution de tension optimale dans le cadre d'une interaction physique dédiée aux MPEC avec des frottements importants.

Dans le chapitre 4, un seuil permettant de limiter le mouvement de rotation de la plateforme mobile a été distingué afin d'éviter la collision entre les câbles et l'effecteur. Cependant, dans certaines configurations les câbles pourraient entrer en collision avec l'effecteur avant d'atteindre ce seuil. Il serait donc pertinent d'intégrer dans la méthode la gestion de collision entre les câbles et la plateforme mobile pendant l'interaction physique avec le MPEC. Lors des expérimentations, des situations ont été observées où l'effecteur pourrait se diriger vers une des limitations de l'espace de travail afin d'éviter le croisement des câbles. Ceci est causé par le calcul du gradient où ce dernier ne prend pas en considération les limitations de l'espace de travail. Une amélioration pourrait être envisagée en tenant compte des limites de l'espace de travail dans le calcul du gradient. Cela permettrait à l'opérateur de naviguer de manière plus intuitive sur l'ensemble de l'espace de travail du MPEC.

Bien que l'utilisation d'une semelle instrumentée pour le changement de mode d'interaction appliqué en industrie constitue une première dans le domaine, deux étapes supplémentaires de validation doivent être réalisées pour compléter les résultats obtenus sur l'algorithme de sélection de mode présenté au chapitre 5. La première est d'augmenter le nombre de participants et d'expériences sur le mécanisme. La deuxième est d'envisager d'autres gestes et activités afin de tester davantage les limites de l'algorithme. Puisque le geste permet uniquement d'activer le mode d'interaction physique, la dernière recommandation serait d'identifier un autre geste pour réactiver le mode de partage des activités.

7.3 Recommandation générale

Malgré que le système interactif apporte des solutions d'amélioration de la sécurité de l'opérateur, on est bien loin des lois établies par *Isaac Asimov* concernant les robots. Dans un contexte d'interaction entre le manipulateur et l'humain, le manque de capacité de perception des manipulateurs et de compréhension de l'humain limitent les applications surtout dans le domaine industriel. Toutefois, les progrès technologiques pourraient apporter de nouvelles solutions dans le futur pour la capacité de perception. Quant à la capacité de compréhension de l'opérateur humain, on peut dire que c'est un sujet d'actualité important qui se développe à travers le domaine de l'intelligence artificielle. Enfin, notre système interactif semble être une avenue prometteuse dans le domaine industriel notamment dans sa capacité d'adaptation, et pourrait même contribuer dans le futur à l'industrie 5.0 ?

« Les espèces qui survivent ne sont pas les espèces les plus fortes, ni les plus intelligentes, mais celles qui s'adaptent le mieux aux changements »

Charles Darwin.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] C. Heyer, "Human-robot interaction and future industrial robotics applications," in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010, pp. 4749-4754.
- [2] A. H. Yanco, and L. J. Drury, "A Taxonomy for Human-Robot Interaction," *AAAI Fall Symposium on Human-Robot Interaction, AAAI Technical Report FS-02-03*, pp. 111-1119, 2002.
- [3] T. T. Hewett, R. Baecker, S. Card, T. Carey, J. Gasen, M. Mantei, G. Perlman, G. Strong, and W. Verplank, *ACM SIGCHI curricula for human-computer interaction*: ACM, 1992.
- [4] Y. Measson, O. David, F. Louveau, and J. P. Friconneau, "Technology and control for hydraulic manipulators," *Fusion Engineering and Design*, vol. 69, no. 1, pp. 129-134, 2003.
- [5] R. A. R. C. Gopura, D. S. V. Bandara, K. Kiguchi, and G. K. I. Mann, "Developments in hardware systems of active upper-limb exoskeleton robots: A review," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 75, pp. 203-220, 2016.
- [6] R. Gopura, K. Kiguchi, and D. Bandara, "A brief review on upper extremity robotic exoskeleton systems," in IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), 2011, pp. 346-351.
- [7] T. Yan, M. Cempini, C. M. Oddo, and N. Vitiello, "Review of assistive strategies in powered lower-limb orthoses and exoskeletons," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 64, pp. 120-136, 2015.
- [8] J. Rekimoto, T. Ishizawa, C. Schwesig, and H. Oba, "PreSense: interaction techniques for finger sensing input devices," in Proceedings of the 16th annual ACM symposium on User interface software and technology, Vancouver, Canada, 2003, pp. 203-212.
- [9] G. Wolbring, and S. Yumakulov, "Social Robots: Views of Staff of a Disability Service Organization," *International Journal of Social Robotics*, vol. 6, no. 3, pp. 457-468, 2014.
- [10] T. Fong, I. Nourbakhsh, and K. Dautenhahn, "A survey of socially interactive robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 42, no. 3-4, pp. 143-166, 2003.
- [11] J. Novikova, and L. Watts, "Towards Artificial Emotions to Assist Social Coordination in HRI," *International Journal of Social Robotics*, 2014.
- [12] P. Letier, and A. Preumont, "Bras exosquelette haptique: conception et contrôle," Université libre de Bruxelles, Faculté des sciences appliquées, Bruxelles, 2010.
- [13] J. Krüger, T. K. Lien, and A. Verl, "Cooperation of human and machines in assembly lines," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 2, pp. 628-646, 2009.
- [14] R. D. Schraft, C. Meyer, C. Parlitz, and E. Helms, "PowerMate-A Safe and Intuitive Robot Assistant for Handling and Assembly Tasks," in Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005, pp. 4074-4079.

- [15] P. Maurice, V. Padois, Y. Measson, and P. Bidaud, "Human-oriented design of collaborative robots," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 57, pp. 88-102, 2017.
- [16] J. E. Colgate, M. Peshkin, and H. S. Klostermeyer, "Intelligent Assist Devices in Industrial Applications: A Review," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, 2003, pp. 2516 - 2521
- [17] A. Albu-Schäffer, S. Haddadin, C. Ott, A. Stemmer, T. Wimböck, and G. Hirzinger, "The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments," *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 34, no. 5, pp. 376-385, 2007.
- [18] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, and G. Hirzinger, "Safety Evaluation of Physical Human-Robot Interaction via Crash-Testing," in *Robotics : Science and Systems Conference*, Atlanta, United State, 2007, pp. 217–224.
- [19] Y. Patel, and P. George, "Parallel manipulators applications—a survey," *Modern Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 03, pp. 57, 2012.
- [20] J.-P. Merlet, and C. Gosselin, "Parallel Mechanisms and Robots," *Springer Handbook of Robotics*, B. Siciliano and O. Khatib, eds., pp. 269-285, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [21] D. Stewart, "A Platform with Six Degrees of Freedom," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 180, no. 1, pp. 371-386, 1965.
- [22] B. Dasgupta, and T. S. Mruthyunjaya, "The Stewart platform manipulator: a review," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 35, no. 1, pp. 15-40, 2000.
- [23] H. Brantmark, and E. Hemmingson, "FlexPicker with PickMaster revolutionizes picking operations," *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 28, no. 5, pp. 414-420, 2001.
- [24] C. Gosselin, "Cable-driven parallel mechanisms: state of the art and perspectives," *Mechanical Engineering Reviews*, vol. 1, no. 1, pp. DSM0004, 2014.
- [25] C. Gosselin, R. Ping, and S. Foucault, "Dynamic trajectory planning of a two-DOF cable-suspended parallel robot," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2012, pp. 1476-1481.
- [26] J. P. Merlet, and D. Daney, "A portable, modular parallel wire crane for rescue operations," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010, pp. 2834-2839.
- [27] L. L. Cone, "Skycam-an aerial robotic camera system," *Byte*, vol. 10, no. 10, pp. 122-132, 1985.
- [28] S. Kawamura, and K. Ito, "A new type of master robot for teleoperation using a radial wire drive system," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS. Proceedings 1993*, pp. 55-60 vol.1.
- [29] H. Yuan, "Static and dynamic stiffness analysis of cable-driven parallel robots," *INSA de Rennes*, 2015.
- [30] A. Pott, H. Mütterich, W. Kraus, V. Schmidt, P. Miermeister, and A. Verl, "IPAnema: a family of cable-driven parallel robots for industrial applications," *Cable-Driven Parallel Robots*, pp. 119-134: Springer, 2013.

- [31] A. Pott, C. Meyer, and A. Verl, "Large-scale assembly of solar power plants with parallel cable robots," in 41st International Symposium on Robotics (ISR) and 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK), 2010, pp. 1-6.
- [32] D. Q. Nguyen, M. Gouttefarde, O. Company, and F. Pierrot, "On the simplifications of cable model in static analysis of large-dimension cable-driven parallel robots," in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013, pp. 928-934.
- [33] J. Lamaury, M. Gouttefarde, A. Chemori, and P. É. Hervé, "Dual-space adaptive control of redundantly actuated cable-driven parallel robots," in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013, pp. 4879-4886.
- [34] J. Lamaury, and M. Gouttefarde, "Control of a large redundantly actuated cable-suspended parallel robot," in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2013, pp. 4659-4664.
- [35] R. G. Roberts, T. Graham, and T. Lippitt, "On the inverse kinematics, statics, and fault tolerance of cable-suspended robots," *Journal of Field Robotics*, vol. 15, no. 10, pp. 581-597, 1998.
- [36] X. Tang, "An Overview of the Development for Cable-Driven Parallel Manipulator," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 6, pp. 823028, 2014.
- [37] M. S. Varziri, and L. Notash, "Kinematic calibration of a wire-actuated parallel robot," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 42, no. 8, pp. 960-976, 2007.
- [38] P. H. Borgstrom, B. L. Jordan, B. J. Borgstrom, M. J. Stealey, G. S. Sukhatme, M. A. Batalin, and W. J. Kaiser, "Nims-pl: A cable-driven robot with self-calibration capabilities," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, no. 5, pp. 1005-1015, 2009.
- [39] G. Reinhart, R. Spillner, and Y. Shen, "Approaches of Applying Human-Robot-Interaction-Technologies to Assist Workers with Musculoskeletal Disorders in Production," *Intelligent Robotics and Applications*, Lecture Notes in Computer Science, pp. 74-84: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [40] A. Sghaier, and P. Charpentier, "La problématique de l'utilisation des robots industriels en matière de sécurité," *Annales des Mines - Réalités industrielles*, pp. 24-31, 2012.
- [41] A. Marty, T. Retsch, and G. Schmitter. "Safety Principles for Industrial Robots," March 6, 2014; <http://www.ilo.org/oshenc/part-viii/safety-applications/item/972-safety-principles-for-industrial-robots>.
- [42] T. Malm, J. Viitaniemi, J. Latokartano, S. Lind, O. Venho-Ahonen, and J. Schabel, "Safety of Interactive Robotics—Learning from Accidents," *International Journal of Social Robotics*, vol. 2, no. 3, pp. 221-227, 2010.
- [43] Association Française de Normalisation, "NF EN ISO 10218-1: Norme européenne : Norme française : Robots pour environnements industriels," AFNOR, 2006.
- [44] Canadian Standards Association, "CAN/CSA-Z434-03: Robots industriels et systèmes robotiques exigences générales de sécurité," CSA, 2008.
- [45] M. Zinn, O. Khatib, B. Roth, and J. K. Salisbury, "Playing It Safe," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 11, no. 2, pp. 12 - 21, 2004.

- [46] A. Bicchi, M. A. Peshkin, and J. E. Colgate, "Safety for Physical Human–Robot interaction," *Springer Handbook of Robotics*, Springer-Verlag, ed., pp. 1335-1346, 2008.
- [47] J. C. Ayena, L. D. C. T, M. J. D. Otis, and B. A. J. Menelas, "An efficient home-based risk of falling assessment test based on Smartphone and instrumented insole," in *IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, 2015, pp. 416-421.
- [48] P. Li, R. Meziane, M. J.-D Otis, H. Ezzaidi, and P. Cardou, "A Smart Safety Helmet using IMU and EEG sensors for worker fatigue detection," in *IEEE International Symposium on RObotic and SEnsors Environments (ROSE)*, Timisoara - Romania, 2014, pp. 55 - 60.
- [49] M. Vasic, and A. Billard, "Safety Issues in Human-Robot Interactions," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* Karlsruhe - Germany, 2013, pp. 197 - 204.
- [50] M. Haddad, T. Chettibi, W. Khalil, and H. Lehtihet, "Trajectory Generation," *Modeling, Performance Analysis and Control of Robot Manipulators*, pp. 189-239: ISTE, 2010.
- [51] W. Khalil, and E. Dombre, "Chapter 13 - Trajectory generation," *Modeling, Identification and Control of Robots*, W. Khalil and E. Dombre, eds., pp. 313-345, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2004.
- [52] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, Third Edition ed.: Pearson/Prentice Hall, 2005.
- [53] S. M. Persson, and I. Sharf, "Sampling-based A* algorithm for robot path-planning," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 33, no. 13, pp. 1683-1708, 2014.
- [54] S. H. Tang, W. Khaksar, N. B. Ismail, and M. K. A. Ariffin, "A Review on Robot Motion Planning Approaches," *Pertanika J Sci & Technol*, vol. 20, no. 1, pp. 15-29 2012.
- [55] A. Gasparetto, P. Boscariol, A. Lanzutti, and R. Vidoni, "Trajectory Planning in Robotics," *Mathematics in Computer Science*, vol. 6, no. 3, pp. 269-279, 2012.
- [56] R. Paul, "Manipulator Cartesian Path Control," *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, vol. 9, no. 11, pp. 702-711, 1979.
- [57] R. H. Taylor, "Planning and Execution of Straight Line Manipulator Trajectories," *IBM Journal of Research and Development*, vol. 23, no. 4, pp. 424-436, 1979.
- [58] R. H. Castain, and R. P. Paul, "An On-Line Dynamic Trajectory Generator," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 3, no. 1, pp. 68-72, 1984.
- [59] S. R. Chang, and U. Y. Huh, "A collision-free G2 continuous path-smoothing algorithm using quadratic polynomial interpolation," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 11, pp. 1-10, 2014.
- [60] H. C. Fang, S. K. Ong, and A. Y. C. Nee, "Interactive robot trajectory planning and simulation using Augmented Reality," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 28, no. 2, pp. 227-237, 2012.
- [61] H. Liu, X. Lai, and W. Wu, "Time-optimal and jerk-continuous trajectory planning for robot manipulators with kinematic constraints," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 29, no. 2, pp. 309-317, 2013.

- [62] L. Chun-Shin, C. Po-Rong, and J. Y. S. Luh, "Formulation and optimization of cubic polynomial joint trajectories for industrial robots," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 28, no. 12, pp. 1066-1074, 1983.
- [63] R. L. Andersson, "Aggressive trajectory generator for a robotic ping-pong player," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1988, pp. 188-193 vol.1.
- [64] P. Chotiprayanakul, D. Liu, D. Wang, and G. Dissanayake, "Collision-Free Trajectory Planning for Manipulator Using Virtual Force based Approach," in *International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST)*, Bangkok, Thailand, 2007, pp. 4.
- [65] M. Geravand, F. Flacco, and A. De Luca, "Human-robot physical interaction and collaboration using an industrial robot with a closed control architecture," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Karlsruhe, Germany, 2013, pp. 4000-4007.
- [66] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1985, pp. 500 - 505.
- [67] F. Flacco, T. Kroger, A. De Luca, and O. Khatib, "A depth space approach to human-robot collision avoidance," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, RiverCentre, Saint Paul, Minnesota - USA, 2012, pp. 338 - 345.
- [68] Khansari-Zadeh, M. Seyed, and A. Billard, "A dynamical system approach to realtime obstacle avoidance," *Autonomous Robots*, vol. 32, no. 4, pp. 433-454, 2012.
- [69] A. Abe, "Trajectory planning for flexible Cartesian robot manipulator by using artificial neural network: numerical simulation and experimental verification," *Robotica*, vol. 29, no. 05, pp. 797-804, 2011.
- [70] S. H. Tang, C. K. Ang, M. K. A. Bin Mohd Ariffin, and S. B. Mashohor, "Predicting the Motion of a Robot Manipulator with Unknown Trajectories Based on an Artificial Neural Network," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, pp. 1, 2014.
- [71] C. Silva, M. Crisostomo, and B. Ribeiro, "MONODA: a neural modular architecture for obstacle avoidance without knowledge of the environment," in *Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks*, 2000, pp. 334-339 vol.6.
- [72] B. Daachi, T. Madani, and A. Benallegue, "Adaptive neural controller for redundant robot manipulators and collision avoidance with mobile obstacles," *Neurocomputing*, vol. 79, no. 0, pp. 50-60, 3/1/, 2012.
- [73] M. S. Kumar, and S. Rajasekaran, "A neural network based path planning algorithm for extinguishing forest fires," *International Journal of Computer Science Issues*, vol. 9, no. 2, pp. 563-568, 2012.
- [74] M. Duguleana, F. G. Barbuceanu, A. Teirelbar, and G. Mogan, "Obstacle avoidance of redundant manipulators using neural networks based reinforcement learning," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 28, no. 2, pp. 132-146, 2012.
- [75] R. Meziane, P. Li, M. J.-D. Otis, H. Ezzaïdi, and P. Cardou, "Safer Hybrid Workspace Using Human-Robot Interaction While Sharing Production Activities," in *IEEE International Symposium on RObotic and SEnsors Environments (ROSE)*, Timisoara - Romania, 2014, pp. 37-42.

- [76] D. Henrich, C. Wurll, and H. Worn, "Online path planning with optimal C-space discretization," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications.*, 1998, pp. 1479-1484
- [77] C. Wurll, and D. Henrich, "Point-to-point and multi-goal path planning for industrial robots," *Journal of Robotic Systems*, vol. 18, no. 8, pp. 445-461, 2001.
- [78] F. Rubio, C. Llopis-Albert, F. Valero, and J. L. Suñer, "Industrial robot efficient trajectory generation without collision through the evolution of the optimal trajectory," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 86, pp. 106-112, 2016.
- [79] H. Wada, A. Kanazawa, K. Konada, Y. Wakabayashi, M. Kamioka, S. Kondo, J. Kinugawa, and K. Kosuge, "Dynamic collision avoidance method for co-worker robot using time augmented configuration-space," in *2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2016, pp. 2564-2569.
- [80] M. J. D. Otis, T.-L. Nguyen-Dang, D. Laurendeau, and C. Gosselin, "Interference estimated time of arrival on a 6-DOF cable-driven haptic foot platform," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA '09 2009*, pp. 1067-1072.
- [81] D. Q. Nguyen, and M. Gouttefarde, "On the improvement of cable collision detection algorithms," *Cable-Driven Parallel Robots*, pp. 29-40: Springer, 2015.
- [82] A. Pott, D. Franitza, and M. Hiller, "Orientation workspace verification for parallel kinematic machines with constant leg length," *Proceedings of the Mechatronics and Robotics, Aachen, Germany, Sept*, pp. 13-15, 2004.
- [83] J. P. Merlet, and D. Daney, "Legs interference checking of parallel robots over a given workspace or trajectory," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA 2006*, pp. 757-762.
- [84] K. Maeda, S. Tadokoro, T. Takamori, M. Hiller, and R. Verhoeven, "On design of a redundant wire-driven parallel robot WARP manipulator," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1999, pp. 895-900.
- [85] S. Perreault, P. Cardou, C. M. Gosselin, and M. J. D. Otis, "Geometric Determination of the Interference-Free Constant-Orientation Workspace of Parallel Cable-Driven Mechanisms," *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 2, no. 3, pp. 031016-031016, 2010.
- [86] N. Riehl, M. Gouttefarde, S. Krut, C. Baradat, and F. Pierrot, "Effects of non-negligible cable mass on the static behavior of large workspace cable-driven parallel mechanisms," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA 2009*, pp. 2193-2198.
- [87] J. P. Merlet, "On the workspace of suspended cable-driven parallel robots," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2016, pp. 841-846.
- [88] H. D. Taghirad, and Y. B. Bedoustani, "An Analytic-Iterative Redundancy Resolution Scheme for Cable-Driven Redundant Parallel Manipulators," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, no. 6, pp. 1137-1143, 2011.
- [89] M. Carricato, and J.-P. Merlet, "Geometrico-Static Analysis of Under-Constrained Cable-Driven Parallel Robots," *Advances in Robot Kinematics: Motion in Man and Machine: Motion in Man and Machine*, J. Lenarcic and M. M. Stanisic, eds., pp. 309-319, Dordrecht: Springer Netherlands, 2010.

- [90] H. D. Taghirad, *Parallel robots: mechanics and control*: CRC press, 2013.
- [91] A. Berti, J.-P. Merlet, and M. Carricato, "Workspace Analysis of Redundant Cable-Suspended Parallel Robots," *Cable-Driven Parallel Robots: Proceedings of the Second International Conference on Cable-Driven Parallel Robots*, A. Pott and T. Bruckmann, eds., pp. 41-53, Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [92] M. Gouttefarde, D. Daney, and J. P. Merlet, "Interval-Analysis-Based Determination of the Wrench-Feasible Workspace of Parallel Cable-Driven Robots," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, no. 1, pp. 1-13, 2011.
- [93] J.-P. Merlet, "On the workspace of suspended cable-driven parallel robots," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2016, pp. 841-846.
- [94] J. Lamaury, and M. Gouttefarde, "A Tension Distribution Method with Improved Computational Efficiency," *Cable-Driven Parallel Robots*, T. Bruckmann and A. Pott, eds., pp. 71-85, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [95] P. Liu, Y. Qiu, Y. Su, and J. Chang, "On the minimum cable tensions for the cable-based parallel robots," *Journal of Applied Mathematics*, 2014.
- [96] M. Gouttefarde, J. Lamaury, C. Reichert, and T. Bruckmann, "A Versatile Tension Distribution Algorithm for n -DOF Parallel Robots Driven by $n+2$ Cables," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 6, pp. 1444-1457, 2015.
- [97] P. Liu, and Y. Qiu, "Tension Optimization for a Cable-driven Parallel Robot with Non-Negligible Cable Mass," *The Open Automation and Control Systems Journal*, vol. 7, no. 1, 2015.
- [98] J.-M. Heo, S.-H. Choi, and K.-S. Park, "Workspace analysis of a 6-DOF cable-driven parallel robot considering pulley bearing friction under ultra-high acceleration," *Microsystem Technologies*, vol. 23, no. 7, pp. 2615-2627, July 01, 2017.
- [99] S. Perreault, P. Cardou, C. m. Gosselin, and M. J.-D Otis, "Analysis of the Interference-Free Constant-Orientation Workspace of Parallel Cable-Driven Manipulators," *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, vol. 130, no. 10, 2010.
- [100] J.-P. Merlet, "Analysis of the influence of wires interference on the workspace of wire robots," *On Advances in Robot Kinematics*, pp. 211-218: Springer, 2004.
- [101] S. Perreault, and C. M. Gosselin, "Cable-Driven Parallel Mechanisms: Application to a Locomotion Interface," *Journal of Mechanical Design*, vol. 130, no. 10, pp. 102301-102301, 2008.
- [102] M. J. D. Otis, S. Perreault, T. L. Nguyen-Dang, P. Lambert, M. Gouttefarde, D. Laurendeau, and C. Gosselin, "Determination and Management of Cable Interferences Between Two 6-DOF Foot Platforms in a Cable-Driven Locomotion Interface," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, vol. 39, no. 3, pp. 528-544, 2009.
- [103] J. Andrade-Cetto, and F. Thomas, "A Wire-Based Active Tracker," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 3, pp. 642-651, 2008.
- [104] Y. Wischnitzer, N. Shvalb, and M. Shoham, "Wire-driven Parallel Robot: Permitting Collisions Between Wires," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 27, no. 9, pp. 1007-1026, 2008.

- [105] V. Duchaine, and C. Gosselin, "Passive Contact Reaction for Enhancing Human-Robot Collaboration," in ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, Tokyo, Japon, 2013.
- [106] M. J.-D. Otis, S. Comtois, D. Laurendeau, and C. Gosselin, "Human Safety Algorithms for a Parallel Cable-Driven Haptic Interface," *Brain, Body and Machine: Proceedings of an International Symposium on the Occasion of the 25th Anniversary of the McGill University Centre for Intelligent Machines*, pp. 187-200, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [107] R. Q. van der Linde, P. Lammertse, F. E. and R. B., "The HapticMaster, a new high-performance haptic interface," in EuroHaptics Edinburgh, UK, 2002, pp. 1-5.
- [108] R. Q. van der Linde, and P. Lammertse, "HapticMaster – a generic force controlled robot for human interaction," *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 30, no. 6, pp. 515-524, 2003.
- [109] V. Duchaine, "Commande des robots destinés à interagir physiquement avec l'humain," Université Laval, Québec, Canada, 2010.
- [110] A. Campeau-Lecours, "Développement d'algorithmes de commande et d'interfaces mécatroniques pour l'interaction physique humain-robot," Philosophiæ Doctor (Ph.D.), Université de Laval Québec, Canada, 2012.
- [111] M. J. D. Otis, V. Duchaine, G. Billette, S. Perreault, C. Gosselin, and D. Laurendeau, "Cartesian Control of a Cable-Driven Haptic Mechanism," *Advances in Haptics*, M. H. Zadeh, ed., 2010.
- [112] J. Jun, X. Jin, A. Pott, S. Park, J.-O. Park, and S. Y. Ko, "Hybrid position/force control using an admittance control scheme in Cartesian space for a 3-DOF planar cable-driven parallel robot," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 1106-1113, 2016.
- [113] M. J. D. Otis, M. Mokhtari, C. d. Tremblay, D. Laurendeau, F. M. d. Rainville, and C. M. Gosselin, "Hybrid Control with Multi-Contact Interactions for 6DOF Haptic Foot Platform on a Cable-Driven Locomotion Interface," in Haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems, 2008, pp. 161-168.
- [114] A. Fortin-Côté, P. Cardou, and C. Gosselin, "An admittance control scheme for haptic interfaces based on cable-driven parallel mechanisms," in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2014, pp. 819-825.
- [115] W. Y. Ho, W. Kraus, A. Mangold, and A. Pott, "Haptic interaction with a cable-driven parallel robot using admittance control," *Cable-Driven Parallel Robots*, pp. 201-212: Springer, 2015.
- [116] A. Campeau-Lecours, M. J.-D. Otis, and C. Gosselin, "Modeling of physical human-robot interaction: Admittance controllers applied to intelligent assist devices with large payload," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 13, no. 5, September, 1, 2016.
- [117] Variense. "Force sensors, FSE103," September, 13, 2017; <http://variense.com/>.
- [118] E. Magrini, F. Flacco, and A. D. Luca, "Estimation of contact forces using a virtual force sensor," in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014, pp. 2126-2133.

- [119] O. Rogalla, M. Ehrenmann, R. Zollner, R. Becher, and R. Dillmann, "Using gesture and speech control for commanding a robot assistant," in 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2002, pp. 454-459.
- [120] P. A. Lasota, T. Fong, and J. A. Shah, "A Survey of Methods for Safe Human-Robot Interaction," *Foundations and Trends® in Robotics*, vol. 5, no. 4, pp. 261-349, 2017.
- [121] S. Haddadin, A. De Luca, and A. Albu-Schäffer, "Robot collisions: A survey on detection, isolation, and identification," *IEEE Transactions on Robotics*, 2017.
- [122] C.-N. Cho, J.-H. Kim, Y.-L. Kim, J.-B. Song, and J.-H. Kyung, "Collision Detection Algorithm to Distinguish Between Intended Contact and Unexpected Collision," *Advanced Robotics*, vol. 26, no. 16, pp. 1825-1840, 2012.
- [123] S.-D. Lee, and J.-B. Song, "Collision detection for safe human-robot cooperation of a redundant manipulator," in 14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 2014, pp. 591-593.
- [124] S. Golz, C. Osendorfer, and S. Haddadin, "Using tactile sensation for learning contact knowledge: Discriminate collision from physical interaction," in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015, pp. 3788-3794.
- [125] T. Ende, S. Haddadin, S. Parusel, T. Wüsthoff, M. Hassenzahl, and A. Albu-Schäffer, "A human-centered approach to robot gesture based communication within collaborative working processes," in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2011, pp. 3367-3374.
- [126] A. De Luca, and F. Flacco, "Integrated control for pHRI: Collision avoidance, detection, reaction and collaboration." pp. 288-295.
- [127] A. Cherubini, R. Passama, A. Meline, A. Crosnier, and P. Fraisse, "Multimodal control for human-robot cooperation," in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Tokyo - Japan, 2013, pp. 2202 - 2207.
- [128] H. Cheng, L. Yang, and Z. Liu, "Survey on 3D hand gesture recognition," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 26, no. 9, pp. 1659-1673, 2016.
- [129] C. Wang, Z. Liu, and S.-C. Chan, "Superpixel-based hand gesture recognition with kinect depth camera," *IEEE transactions on multimedia*, vol. 17, no. 1, pp. 29-39, 2015.
- [130] A. R. Sarkar, G. Sanyal, and S. Majumder, "Hand gesture recognition systems: a survey," *International Journal of Computer Applications*, vol. 71, no. 15, 2013.
- [131] H. Liu, and L. Wang, "Gesture recognition for human-robot collaboration: A review," *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2017.
- [132] C. Matuszek, L. Bo, L. Zettlemoyer, and D. Fox, "Learning from Unscripted Deictic Gesture and Language for Human-Robot Interactions," in AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2014, pp. 2556-2563.
- [133] S. Maksymova, R. Matarneh, V. V. Lyashenko, and N. V. Belova, "Voice Control for an Industrial Robot as a Combination of Various Robotic Assembly Process Models," *Journal of Computer and Communications*, vol. 5, no. 11, pp. 1, 2017.
- [134] C. A. Cifuentes, A. Frizera, R. Carelli, and T. Bastos, "Human-robot interaction based on wearable IMU sensor and laser range finder," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 62, no. 10, pp. 1425-1439, 2014.

- [135] J. Liu, L. Zhong, J. Wickramasuriya, and V. Vasudevan, "uWave: Accelerometer-based personalized gesture recognition and its applications," *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 5, no. 6, pp. 657-675, 2009.
- [136] L. Porzi, S. Messelodi, C. M. Modena, and E. Ricci, "A smart watch-based gesture recognition system for assisting people with visual impairments," in 3rd ACM international workshop on Interactive multimedia on mobile & portable devices, Barcelona, Spain, 2013, pp. 19-24.
- [137] A. Akl, and S. Valaee, "Accelerometer-based gesture recognition via dynamic-time warping, affinity propagation, & compressive sensing," in IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP), Dallas, TX, 2010, pp. 2270-2273.
- [138] B. Caby, S. Kieffer, M. De Saint Hubert, G. Cremer, and B. Macq, "Feature extraction and selection for objective gait analysis and fall risk assessment by accelerometry," *Biomed Eng Online*, vol. 10, pp. 1, 2011.
- [139] P. Boissy, S. Choquette, M. Hamel, and N. Noury, "User-based motion sensing and fuzzy logic for automated fall detection in older adults," *Telemed J E Health*, vol. 13, no. 6, pp. 683-93, December, 21, 2007.
- [140] M. Romaszewski, P. Głomb, and P. Gawron, "Natural hand gestures for human identification in a human-computer interface," in 4th International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA), 2014, pp. 1-6.
- [141] D. Balakrishna, P. Sailaja, R. P. Rao, and B. Indurkha, "A novel human robot interaction using the Wiimote," in IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2010, pp. 645-650.
- [142] S. Alavi, D. Arsenault, and A. Whitehead, "Quaternion-Based Gesture Recognition Using Wireless Wearable Motion Capture Sensors," *Sensors*, vol. 16, no. 5, pp. 605, 2016.
- [143] S. Bhattacharya, and N. D. Lane, "From smart to deep: Robust activity recognition on smartwatches using deep learning," in IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops) 2016, pp. 1-6.
- [144] A. Meier, D. J. Matthies, B. Urban, and R. Wettach, "Exploring vibrotactile feedback on the body and foot for the purpose of pedestrian navigation," in Proceedings of the 2nd international Workshop on Sensor-based Activity Recognition and Interaction, 2015, pp. 11.
- [145] R. Velázquez, O. Bazán, and J. Varona, "Wearable Electronic Tactile Display for the Foot," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 89, no. 4, pp. 180-184, 2013.
- [146] R. Velázquez, O. Bazán, J. Varona, C. Delgado-Mata, and C. A. Gutiérrez, "Insights into the capabilities of tactile-foot perception," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 9, no. 5, pp. 179, 2012.
- [147] M. Ben Brahem, B.-A.-J. Ménélas, and M. J.-D. Otis, "Use of a 3DOF accelerometer for foot tracking and gesture recognition in mobile HCI," *Procedia Computer Science*, vol. 19, pp. 453-460, 2013.

- [148] J. C. Ayena, H. Zaibi, M. J.-D. Otis, and B.-A. J. Ménelas, "Home-based risk of falling assessment test using a closed-loop balance model," *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, vol. 24, no. 12, pp. 1351-1362, 2016.
- [149] C. J. Ayena, "Conception, réalisation et évaluation d'un système interactif dédié à la réduction des risques de chutes pour les personnes atteintes de la maladie de Parkinson," Université du Québec à Chicoutimi, 2017.
- [150] B. A. J. Menelas, and M. J. D. Otis, "Use of Foot for Direct Interactions with Entities of a Virtual Environment Displayed on a Mobile Device," in *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2013, pp. 3745-3750.
- [151] M. J.-D. Otis, and B. A. J. Menelas, "Toward an augmented shoe for preventing falls related to physical conditions of the soil," in *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2012, pp. 3281-3285.
- [152] É. Polesel, *Étude de l'inclusion de la détection des activités humaines dans une cellule de travail hybride dédiée à la commande intelligente de robots via ROS en utilisant un réseau de capteurs portables sans fil*, Department of Applied Sciences, University of Quebec at Chicoutimi, Canada, 2015.
- [153] M. Park, and Y. Gao, "Error analysis and stochastic modeling of low-cost MEMS accelerometer," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 46, no. 1, pp. 27-41, 2006.
- [154] G. G. Wang, and S. Shan, "Review of metamodeling techniques in support of engineering design optimization," *Journal of Mechanical design*, vol. 129, no. 4, pp. 370-380, 2007.
- [155] R. Jin, W. Chen, and T. W. Simpson, "Comparative studies of metamodeling techniques under multiple modelling criteria," *Structural and multidisciplinary optimization*, vol. 23, no. 1, pp. 1-13, 2001.
- [156] A. A. Giunta, and L. T. Watson, "A comparison of approximation modeling techniques: polynomial versus interpolating models," 1998.
- [157] E. González-Romera, M. A. Jaramillo-Morán, and D. Carmona-Fernández, "Monthly electric energy demand forecasting with neural networks and Fourier series," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 11, pp. 3135-3142, 2008.
- [158] C.-L. Tsai, W. T. Chen, and C.-S. Chang, "Polynomial-Fourier series model for analyzing and predicting electricity consumption in buildings," *Energy and Buildings*, vol. 127, pp. 301-312, 2016.
- [159] L. Reichel, G. Ammar, and W. Gragg, "Discrete least squares approximation by trigonometric polynomials," *Mathematics of Computation*, vol. 57, no. 195, pp. 273-289, 1991.
- [160] A. De Santis, and B. Siciliano, "Reactive collision avoidance for safer human-robot interaction," *IARP-IEEE/RAS-EURON Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments, Roma, Italy* 2007.
- [161] F. Wallhoff, J. Blume, A. Bannat, W. Rösel, C. Lenz, and A. Knoll, "A skill-based approach towards hybrid assembly," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 24, no. 3, pp. 329-339, 2010.
- [162] J. A. Rivera-Bautista, A. Marin-Hernandez, and L. F. Marin-Urias, "Using color histograms and range data to track trajectories of moving people from a mobile robot

- platform,” in 22nd International Conference on Electrical Communications and Computers (CONIELECOMP), Cholula, Puebla, 2012, pp. 288-293.
- [163] N. Bellotto, and H. Huosheng, “Multisensor-Based Human Detection and Tracking for Mobile Service Robots,” *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 39, no. 1, pp. 167-181, 2009.
 - [164] J. Xavier, M. Pacheco, D. Castro, A. Ruano, and U. Nunes, "Fast Line, Arc/Circle and Leg Detection from Laser Scan Data in a Player Driver." pp. 3930-3935.
 - [165] R. Meziane, P. Cardou, M. J.-D Otis, and H. Ezzaidi, “Cable Interference Control in Physical Interaction for Cable-Driven Parallel Mechanisms,” *Mechanism and Machine Theory*, Submitted, 2018.
 - [166] R. Meziane, M. J.-D Otis, and H. Ezzaidi, “Human-robot collaboration while Sharing Production Activities in Dynamic Environment : SPADER system,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 48, pp. 243–253, 2017.
 - [167] E. Barkallah, “Conception et évaluation d'un instrument de mesure pour la détection des postures et des mouvements contraignants menant à l'apparition des troubles musculosquelettiques en milieu de travail à l'aide de réseaux de neurones,” Department of Applied Sciences, University of Quebec at Chicoutimi, Canada, 2016.
 - [168] E. Barkallah, M. J.-D Otis, S. Ngomo, and M. Heraud, “Measuring Operator’s Pain: Toward Evaluating Musculoskeletal Disorder at Work,” in IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2015.
 - [169] E. Barkallah, J. Freulard, M. Otis, S. Ngomo, J. Ayena, and C. Desrosiers, “Wearable Devices for Classification of Inadequate Posture at Work Using Neural Networks,” *Sensors*, vol. 17, no. 9, pp. 2003, 2017.
 - [170] Q. Wang, J. Yang, M. Ren, and Y. Zheng, “Driver fatigue detection: a survey,” in The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation WCICA 2006, pp. 8587-8591.
 - [171] Y. Wang, X. Liu, Y. Zhang, Z. Zhu, D. Liu, and J. Sun, “Driving Fatigue Detection Based on EEG Signal,” in Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2015, pp. 715-718.
 - [172] S. A. Hosseini, and M. A. Khalilzadeh, “Emotional stress recognition system using EEG and psychophysiological signals: Using new labelling process of EEG signals in emotional stress state,” in International Conference on Biomedical Engineering and Computer Science (ICBECS), 2010, pp. 1-6.
 - [173] C. A. Ronao, and S.-B. Cho, “Human activity recognition with smartphone sensors using deep learning neural networks,” *Expert Systems with Applications*, vol. 59, pp. 235-244, 2016.
 - [174] M. Ziaeeefard, and R. Bergevin, “Semantic human activity recognition: A literature review,” *Pattern Recognition*, vol. 48, no. 8, pp. 2329-2345, 2015.
 - [175] P. Li, “Safety analysis using a Smart Safety Helmet embedded with IMU and EEG sensors applied in industrial facility,” Department of Applied Sciences, University of Quebec at Chicoutimi, Canada, 2015.

ANNEXE

ANNEXE 1 : CERTIFICAT D'ÉTHIQUE

Dans cette annexe deux certificats d'éthique sont présentés : la première approbation fait suite à la première demande déposée auprès du comité d'éthique de la recherche à l'UQAC. Le deuxième certificat a été approuvé dans le cadre d'une demande de modification. Ils ont permis de pratiquer des expériences sur la plateforme hybride avec des participants humains tels que présenté à la section 6.5.2.



Comité d'éthique de la recherche
Université du Québec à Chicoutimi

APPROBATION ÉTHIQUE

Dans le cadre de l'*Énoncé de politique des trois conseils : éthique de la recherche avec des êtres humains 2* et conformément au mandat qui lui a été confié par la résolution CAD-7163 du Conseil d'administration de l'Université du Québec à Chicoutimi, approuvant la *Politique d'éthique de la recherche avec des êtres humains* de l'UQAC, le Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'Université du Québec à Chicoutimi, à l'unanimité, délivre la présente approbation éthique puisque le projet de recherche mentionné ci-dessous rencontre les exigences en matière éthique et remplit les conditions d'approbation dudit Comité.

Responsable(s) du projet de recherche :	Monsieur Ramy Meziane <i>Étudiant, Doctorat en ingénierie, UQAC</i> Monsieur Ping Li <i>Étudiant, Maîtrise en ingénierie, UQAC</i>
Direction de recherche :	Monsieur Martin Otis, DSA, UQAC
Codirection de recherche :	Monsieur Hassan Ezzaidi, DSA, UQAC
Cochercheur(s) :	Monsieur Philippe Cardou, Université Laval
Projet de recherche intitulé :	<i>Évaluation d'un casque de sécurité intelligent pour prévenir les risques d'accidents lors d'interactions humain-robot.</i>


No référence : 602.435.01

La présente est valide jusqu'au 31 décembre 2015.

Rapport de statut attendu pour le **31 mai 2015 (rapport annuel)** et le **30 novembre 2015 (rapport final)**.

N.B. le rapport de statut est disponible à partir du lien suivant : <http://www.uqac.ca/recherche/cer/prolongation.php>

Date d'émission initiale de l'approbation : 4 juin 2014
Date(s) de renouvellement de l'approbation :


Nicole Huybens, Présidente



Comité d'éthique de la recherche
Université du Québec à Chicoutimi

APPROBATION ÉTHIQUE

Dans le cadre de l'Énoncé de politique des trois conseils : éthique de la recherche avec des êtres humains 2 (2014) et conformément au mandat qui lui a été confié par la résolution CAD-7163 du Conseil d'administration de l'Université du Québec à Chicoutimi, approuvant la *Politique d'éthique de la recherche avec des êtres humains* de l'UQAC, le Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'Université du Québec à Chicoutimi, à l'unanimité, délivre la présente approbation éthique puisque le projet de recherche mentionné ci-dessous rencontre les exigences en matière éthique et remplit les conditions d'approbation dudit Comité.

Responsable(s) du projet de recherche :	<i>Monsieur Ramy Meziane, Étudiant Doctorat en ingénierie, UQAC</i>
Direction de recherche :	<i>Monsieur Martin Otis, Professeur Département des sciences appliquées, UQAC</i>
Codirection de recherche :	<i>Monsieur Hassan Eggaidi, Professeur Département des sciences appliquées, UQAC</i>
Cochercheur(s) :	<i>Monsieur Philippe Cardou, Professeur Université Laval Monsieur Houssein Amamou, Étudiant Maîtrise en ingénierie, UQAC</i>
Projet de recherche intitulé :	<i>Évaluation d'un casque de sécurité intelligent pour prévenir les risques d'accidents lors d'interactions humain-robot</i>

No référence : 602.435.01

La présente est valide jusqu'au 31 décembre 2016.

Rapport de statut attendu pour le **30 novembre 2016 (rapport final)**.

N.B. le rapport de statut est disponible à partir du lien suivant : <http://recherche.uqac.ca/rapport-de-statut/>

Date d'émission initiale de l'approbation : 22 mai 2014
Date(s) de renouvellement de l'approbation : 9 juin 2015

Nicole Bouchard,
Professeure et présidente